



FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE

MÈMOIRE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER RECHERCHE

Domaine : Mathématiques et Informatique Filière : Informatique

Spécialité : Administration et Sécurité des Réseaux

Présenté par

Mlle. BENSEKHRI Melissa

Mlle. DJOUDER Amira

Thème

Évaluation des performances de la norme 802.11be

Soutenu le 03 Juillet 2024.

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
M. M. YAZID Mohand	Professeur	Université de Béjaïa	Président
M. MOKTEFI Mohand	MCB	Université de Béjaïa	Rapporteur
Mlle. MAMMRI Souhila	MCB	Université de Béjaïa	Examinatrice

Année Universitaire : 2023/2024

REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé au sein du département Informatique, à l'Université Abderrehamne Mira campus Targua Ouzmour, Béjaia.

En tout premier lieu, nous rendons grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la sagesse et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce projet.

Nous tenons ensuite à exprimer nos sincères remerciements à notre directeur de mémoire, Monsieur MOKTEFI Mohand, pour son encadrement attentif, ses judicieux conseils et son soutien indéfectible tout au long de la réalisation de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer et d'apprécier ce mémoire avec bienveillance.

Nous remercions également l'ensemble du corps professoral de notre département, qui nous a transmis leurs connaissances et leur expertise avec dévouement durant notre formation.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce projet.

DÉDICACE

Melissa BENSEKHRI

À mes très chers parents, Alia CHIKHOUNE et Slimane BENSEKHRI,

C'est avec une immense gratitude que je dédie ce mémoire de fin de cycle à quatre personnes qui ont toujours été ma source inépuisable de soutien, d'amour et d'inspiration : mes parents et mes deux frères, Lounis et Riadh. Votre encouragement constant et votre foi en moi ont été les moteurs qui m'ont poussé à donner le meilleur de moi-même à chaque étape de ma vie.

Vos valeurs, votre dévouement et votre exemple m'ont façonné en une personne déterminée et ambitieuse. Chaque succès que j'atteins est un reflet des valeurs que vous m'avez inculquées. Votre confiance en mes capacités a été mon roc, me guidant à travers les défis et les réussites de cette expérience.

En vous dédiant ce mémoire, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance pour votre soutien inconditionnel et votre amour infini.

Avec tout mon amour et ma gratitude,

Melissa BENSEKHRI

Amira DJOUDER

Je dédie ce modeste travail à

Ma maman, qui m'a toujours soutenue et encouragée durant ces années d'études, qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance. Son amour et sa bienveillance ont été essentiels à l'accomplissement de ce travail.

Mon père, mon pilier dans la vie, qui a toujours été là pour mon bonheur. Ses conseils avisés et son soutien indéfectible m'ont guidée tout au long de mon parcours.

Mes frères Tarek, Walid et Bilal, qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotions lors de la réalisation de ce travail. Leur présence et leur affection ont été un réel réconfort.

Mes deux sœurs chéries, Salma et Soumia, qui ont su m'épauler et me réconforter dans les moments les plus difficiles. Leur complicité et leur amour fraternel m'ont été d'un soutien inestimable.

Mes belles-sœurs Hassiba et Marwa, qui font partie intégrante de ma famille et m'ont toujours entourée de leur affection.

Mes nièces Lyna, Nourhane, Ilyne, Israa et Tasnime, ainsi que mes neveux Wassime, Safwane et Yaakoub. Leur joie de vivre et leur tendresse ont illuminé mon quotidien.

Mon mari Soufiane, qui a changé ma vie et n'a cessé de me conseiller et d'encourager tout au long de mon parcours. Son soutien inconditionnel et son amour m'ont permis de donner le meilleur de moi-même.

Ma famille, mes proches, et tous ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité. Votre présence à mes côtés a été une source d'inspiration et de motivation.

DJOUUDER Amira

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Introduction générale	1
I GÉNÉRALITÉS SUR LE WIFI	3
I.1 Introduction	3
I.2 Standard 802.11 et architecture réseau	4
I.2.1 Mode ad hoc	4
I.2.2 Le mode infrastructure	4
I.3 Base de la couche de contrôle au média	5
I.3.1 Distributed Coordination Function (DCF)	6
I.3.2 Description du mode PCF	12
I.3.3 Hybrid Coordination Function(HCF)	13
I.3.4 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)	13
I.3.5 HCF Controlled Channel Access (HCCA)	14
I.4 La couche physique	14
I.4.1 DSSS	15
I.4.2 FHSS	15
I.4.3 IR	15

I.4.4	OFDM	16
I.5	Conclusion	16
II	NOUVELLES GÉNÉRATIONS DE NORMES	17
II.1	Introduction	17
II.2	La norme 802.11 ac	17
II.2.1	Utilisation de canneau	18
II.2.2	MIMO	19
II.2.3	Le beamforming	20
II.2.4	Améliorations de l'agrégation de trames dans le cadre de la norme 802.11ac	21
II.2.5	Modulation 256-QAM et différentes MCS (Modulation and Co-ding Scheme)	21
II.3	La norme 802.11 ax	23
II.3.1	Fonctionnement dans les spectres 2,4 et 5 GHZ	23
II.3.2	OFDMA	23
II.3.3	MIMO multi-utilisateur	24
II.3.4	1024-QAM	25
II.3.5	BSS Color	25
II.4	La norme 802.11 be	26
II.4.1	Fonctionnalités candidates de l'IEEE 802.11be	26
II.4.2	OFDMA amélioré	30
II.4.3	Multi link operation (MLO)	31
II.4.4	Architecture multi-liens	31
II.4.5	Accès multi-liens au canal	33
II.4.6	Topologie des appareils MLO (Multi-Link Operation) dans le Wi-Fi 7	34
II.4.7	Opération multi-liens pour RTA	35
II.5	Conclusion	37
III	ÉTAT DE L'ART DES TRAVAUX DE RECHERCHE	38
III.1	Introduction	38
III.2	Travaux connexes	38
III.2.1	Muli-Link Operation dans l'IEEE 802.11be	38
III.2.2	Tableau Comparatif	49
III.3	Conclusion	49
IV	Simulation et résultats	50
IV.1	Introduction	50
IV.2	Pourquoi Matlab?	50

IV.3 Proposition	51
IV.3.1 Description de la méthode	51
IV.3.2 Problème de Free-Reding	52
IV.3.3 Solution proposée	52
IV.3.4 Repick d'un compteur de backoff	53
IV.3.5 Doublement de CW avec compensation	53
IV.3.6 Pseudo Algorithme	55
IV.4 Simulation	56
IV.4.1 Paramètres de Simulation	56
IV.4.2 Discussions et Résultats	56
IV.5 Conclusion	58
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	59
BIBLIOGRAPHIE	63

LISTE DES FIGURES

I.1	Mode ad hoc	4
I.2	Mode infrastructure	5
I.3	CSMA/CA	8
I.4	noeud cachée	9
I.5	Noeuds cachés dans une chaîne	9
I.6	Multiplés noeuds cachés	10
I.7	noeud exposé	10
I.8	Mecanisme RTS CTS	12
I.9	La modulation OFDM.	16
II.1	Comparaison des normes IEEE802.11	18
II.2	Sélection de canal primaire et secondaire	19
II.3	Divers concepts MIMO a) SU-MIMO beamforming; b) downlin	21
II.4	Diagrammes de constellation 64-QAM	22
II.5	Diagrammes de constellation 256-QAM.PNG	22
II.6	OFMDA dans la norme 802.11 ax	24
II.7	Diagramme de constellation : 1024-QAM.	25
II.8	Chronologie du processus de normalisation du standard 11be	26
II.9	Diagramme de constellation 4096-QAM	27
II.10	Un AP de wifi 7 supportant 16 antennes	29
II.11	Le format de trame EHT	30
II.12	Détection automatique du préambule pour les trames héritées	30

II.13 Exemple de transmission OFDMA MIMO dans le cadre de la norme 802.11be	31
II.14 Architecture de système à liens multiples	32
II.15 Architecture commune UMAC et de mise en file d'attente pour l'agrégation de liens au niveau des paquets	33
II.16 Mode de transmission Multi-Lien	34
II.17 Mode Duplication et Mode Conjoint	36
IV.1 Logo MATLAB	51
IV.2 Problème concernant la coexistence des MLDs EHT avec les périphériques hérités . .	52
IV.3 Repicker un compteur de backoff (Repick)	53
IV.4 Schéma de l'approche	54
IV.5 Le débit des stations MLD et les stations héritées en fonction de la méthode utilisée . .	57
IV.6 Le temps de transmission des stations MLD et les stations héritées en fonction de la méthode utilisée	57
IV.7 Le nombre des stations MLD et les stations héritées en fonction de la méthode utilisé .	58

LISTE DES TABLEAUX

III.1 Tableau comparatif	49
IV.1 Paramètres de Simulation	56

LISTE DES ABRÉVIATIONS

3GPP 3rd Generation Partnership Project

A-MPDU Aggregated MAC Protocol Data Unit

ACK acknowledgment

AIFS Arbitration Inter-Frame Space

AP Access Point

AR Augmented Reality

bo Backoff

bo Backoff

BSA Basic Service Area

BSS Basic Service Set

BSS Basic Service Set

BSSID Basic Service Set Identification

CAP Controlled Access Period

CCA Clear Channel Assessment

CCK Complementary Code Keying

CF Contention Free

CFP Contention Free Period

CP	Contention Period
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSI	Channel State Information
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTS	Clear To Send
CW	Contention Window
CW	Contention Window
CW	Contention Window
DCF	Distributed Coordination Function
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	DCF Inter-Frame Space
DL-MU-MIMO	Downlink Multi-User Multiple-Input Multiple-Output
DL	Downlink
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DS	Distribution System
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EHT-SIG	Extremely High Throughput Signal
EHT	Extremely High Throughput
eMLSR	Enhanced Multi-Link Service Region
ESA	Access with Collision Avoidance
FC	Frame Control
FCS	Frame Check Sequence
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FRR	False Rejection Rate
FTTH	Fiber To The Home

HCCA HCF Controlled Channel Access

HCF Hybrid Coordination Function

HDTV High Definition Television

HR-DSSS High-Rate Direct Sequence Spread Spectrum

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT Internet of Things

IR Infrared

L-SIG Legacy Signal

LFTA Legacy Friendly Traffic Allocation Strategy

LLC Logical Link Control

LLC Logical Link Control

LMAC Logical MAC

LPWAN Low-Power Wide-Area Networks

LTF Long Training Field

MAC Media Access Control

MAC Media Access Control

MAC Media Access Control

MCS Modulation and Coding Scheme

MIMO Multiple-Input Multiple-Output

MLD Multi-Link Device

MLD Multi-Link Device

MLD Multi-Link Device

MLMR Multi-Link Multi-Radio

MLMR Multi-Link Multi-Radio

MLO Multi-Link Operation

MLO Multi-Link Operation

MLO Multi-Link Operation

MLSR Multi-Link Service Region

MLSR Multi-Link Service Region

MSDU MAC Service Data Unit

MU-MIMO Multi-User Multiple-Input Multiple-Output

MU Multi-User

NAV Network Allocation Vector

NDP VHT Non-Data Packet Very High Throughput

NDPA Null Data Packet Announcement

NSTR-MLMR Non-Simultaneous Transmission and Reception Multi-Link Multi-Radio

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PCF Point Coordination Function

PDP Power Delay Profile

PER Packet Error Rate

PHY Physical Layer

PHY Physical Layer

PIFS PCF Inter-Frame Space

PPDU Physical Layer Convergence Procedure Protocol Data Unit

PPM Pulse Position Modulation

PSPoll Power Save Poll

QAM Quadrature Amplitude Modulation

QoS Quality of Service

RF Radio Frequency

RF Radio Frequency

RF Radio Frequency

RTA Real-Time Application

RTS	Request To Send
RU	Resource Unit
SAP	Service Access Point
SC	Sequence Control
SIFS	Short Inter-Frame Space
SLD	Single-Link Device
SLO	Single-Link Operation
SL	Single-Link
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SR	Spatial Reuse
SS	Spatial Streams
STA	Station
STF	Short Training Field
STR-MLMR	Simultaneous Transmission and Reception Multi-Link Multi-Radio
STR	Simultaneous Transmission and Reception
STR	Simultaneous Transmission and Reception
SU-MIMO	Single-User Multiple-Input Multiple-Output
Sync-FT	Fast Transmission Synchronization
Sync-FT	Fast Transmission Synchronization
TC	Traffic Class
TGbe	Task Group be
TID	Traffic Identifier
TP	Transmission Power
TS	Thompson Sampling
TWT	Target Wake Time
TXOP	Transmission Opportunity
U-SIG	User Signal

UCB Upper Bound Confidence

UL Uplink

UMAC Upper MAC

VHT PPDU Very High Throughput Physical Layer Convergence Procedure Protocol Data Unit

VHT Very High Throughput

Wi-Fi Wireless Fidelity

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN Wireless Local Area Network

WLAN Wireless Local Area Network

WLAN Wireless Local Area Networks

WMAN Wireless Metropolitan Area Networks

WMM Wi-Fi Multimedia

WPAN Wireless Personal Area Networks

WWAN Wireless Wide Area Networks

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le WiFi, abréviation de "Wireless Fidelity", est devenu une technologie omniprésente dans notre vie quotidienne. Basé sur le standard IEEE 802.11, le WiFi permet la connexion sans fil de divers appareils électroniques à un réseau informatique grâce à l'utilisation d'ondes radio. Depuis ses origines dans les années 1990, cette technologie de réseau local sans fil a connu une évolution constante, s'adaptant aux besoins croissants en matière de débit, de latence et de fiabilité.

Les performances du WiFi ont été significativement améliorées au fil des différentes normes IEEE 802.11. La norme 802.11ac, introduite en 2013, a franchi une nouvelle étape en atteignant des débits théoriques jusqu'à 6,9 Gbit/s grâce à l'utilisation du multicanal et de la modulation 256-QAM.

Plus récemment, 802.11ax, également appelé "WiFi 6", s'est concentré sur l'amélioration de l'efficacité spectrale et de la couverture, offrant des débits théoriques allant jusqu'à 9,6 Gbit/s. Cette norme a notamment introduit des techniques d'OFDMA et d'allocation dynamique des ressources.

La prochaine norme, 802.11be ou "Extremely High Throughput" (EHT), vise à repousser encore les limites des performances du WiFi. Prévues pour être finalisées en 2024, cette nouvelle version du standard WiFi introduira des techniques innovantes telles que la "multilink operation", permettant aux appareils de se connecter simultanément à plusieurs points d'accès ou canaux. L'objectif est d'atteindre des débits cibles allant jusqu'à 30 Gbit/s, offrant ainsi une connectivité sans fil encore plus performante pour répondre aux besoins futurs.

Ce mémoire de fin d'études se concentre sur l'évaluation des performances de la dernière norme en date, 802.11be, également connue sous le nom d'"Extremely High Throughput" (EHT). Cette nouvelle version du standard WiFi, qui devrait être finalisée en 2024, vise à offrir des débits encore plus élevés et une meilleure qualité de service. Divisé en quatre chapitres, ce travail vous permettra de vous familiariser avec les généralités sur le WiFi, les évolutions apportées par les normes 802.11ac,

802.11ax et 802.11be, ainsi que les principales techniques innovantes proposées dans la littérature.

Le premier chapitre dressera un panorama général du WiFi, en abordant ses origines, son fonctionnement de base et ses principaux usages. Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude approfondie des nouvelles normes 802.11ac, 802.11ax et 802.11be, mettant en lumière les améliorations clés apportées en termes de débit, de connectivité et de qualité de service. Par exemple, la norme 802.11ac a introduit le multicanal et la modulation 256-QAM, tandis que 802.11ax a mis l'accent sur l'amélioration de l'efficacité spectrale et de la couverture.

Le troisième chapitre se focalisera sur l'état de l'art des techniques de multilink operation, une approche prometteuse visant à exploiter simultanément plusieurs connexions réseau afin d'optimiser les performances. Nous y présenterons un résumé des principales solutions proposées dans la littérature et effectuerons une analyse comparative pour identifier les tendances et les innovations majeures.

Enfin, le dernier chapitre détaillera notre approche proposée pour l'amélioration des performances du 802.11be, en s'appuyant sur les enseignements tirés de l'état de l'art. Nous décrirons la mise en œuvre de notre solution, les scénarios de simulation et les résultats obtenus, démontrant ainsi les bénéfices apportés par notre contribution.

CHAPITRE

I

GÉNÉRALITÉS SUR LE WIFI

I.1 Introduction

Actuellement, les réseaux sans fil sont en plein essor, avec une prolifération rapide tant dans les entreprises que chez les particuliers. Leur succès réside dans leur mobilité et flexibilité, permettant une connectivité continue en déplacement et supprimant les contraintes liées aux câbles.

Il existe divers types de réseaux sans fil, chacun répondant à des besoins spécifiques. Les WPAN (Wireless Personal Area Networks), comme Bluetooth et Zigbee, permettent la connexion d'appareils personnels sur de courtes distances. Les WLAN (Wireless Local Area Networks), principalement représentés par le Wi-Fi, offrent une connectivité internet dans des espaces locaux tels que les habitations et les bureaux. Les WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks), avec des technologies comme WiMAX, couvrent de grandes zones métropolitaines. Les WWAN (Wireless Wide Area Networks), qui utilisent des technologies cellulaires comme 3G, 4G et 5G, assurent une couverture étendue. Enfin, les LPWAN (Low-Power Wide-Area Networks), tels que LoRaWAN et Sigfox, sont conçus pour les applications IoT nécessitant une longue portée et une faible consommation d'énergie. Chaque catégorie de réseau sans fil répond à des critères spécifiques en termes de portée, débit et efficacité énergétique.

L'objectif de ce chapitre est de détailler le standard 802.11, largement utilisé dans les réseaux locaux sans fil. Nous débuterons par une présentation du protocole IEEE 802.11 et de son architecture réseau, puis nous analyserons la couche de contrôle d'accès au média et la couche physique, et enfin,

nous examinerons les différentes évolutions du protocole.

I.2 Standard 802.11 et architecture réseau

802.11 est une norme établie par l'IEEE, elle décrit les couches physiques et MAC d'interfaces réseau radio et infra-rouge. Les débits possibles varient entre 1 et 54 Mbit/s suivant les techniques et les éventuelles extensions de la norme employée. Les portées prévues varient entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres en fonction de la vitesse choisie et de l'environnement. Cette norme cible deux contextes d'utilisation [11] :

I.2.1 Mode ad hoc

C'est la première architecture définie dans la norme 802.11 permet une communication d'égal à égal entre au moins deux stations mobiles ou fixes. Elle est nommée Indépendant Basic Service Set (IBSS), pour former des réseaux ad hoc. Elle autorise une communication en direct entre les différents postes dont les cellules sont recouvrantes, au sein d'un réseau autonome, auquel ils sont associés. (Voir la Figure I.1) [11] [9].

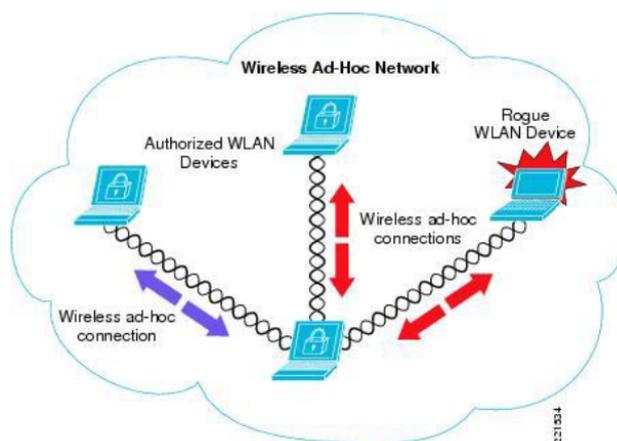


FIGURE I.1 – Mode ad hoc

I.2.2 Le mode infrastructure

Architecture Basic Service Set (BSS)

Cette architecture nécessite un composant d'infrastructure, nommé Access Point (AP), en français point d'accès. Il permet l'interconnexion du réseau sans fil avec le réseau local filaire de l'entreprise, nommé dans les standards Distribution System (DS). Dans ce Basic Service Set (BSS), le point d'accès

agit comme un maître pour les stations périphériques qui lui sont associées. Toutes les communications doivent passer par lui. Le point d'accès définit ici une cellule nommée Basic Service Area (BSA), dont le nom est l'adresse MAC du point d'accès, ce qu'on appelle le Basic Service Set Identification (BSSID). Ce réseau peut être nommé et saisi sur le point d'accès. Une salle de réunion peut ainsi être équipée, offrant un accès sans fil aux serveurs de l'entreprise, eux-mêmes connectés au réseau filaire (Voir la Figure I.2)[11] [3].

Architecture Extended Service Set (ESS)

Un réseau de plus grande étendue, Extended Service Area (ESA) peut être défini avec plusieurs AP. On parle dans ce cas de réseau Extended Service Set (ESS), qui permet une communication sans fil entre ordinateurs associés à des points d'accès distincts. Pour cela, les cellules définies par ces derniers ne sont pas obligatoirement recouvrantes, étant donné que le système de distribution (DS) est utilisé pour prolonger la communication. Si l'itinérance complète des équipements portables est souhaitée, un recouvrement des cellules est recommandé. En effet, l'ordinateur peut ainsi s'associer à un autre point d'accès sans coupure de communication. Cette action de roaming utilise, pour ce basculement, le réseau filaire (Voir la Figure I.2)[3][11].

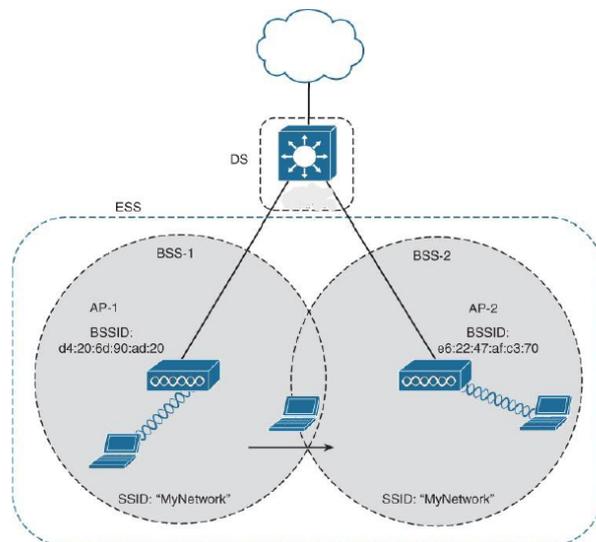


FIGURE I.2 – Mode infrastructure

I.3 Base de la couche de contrôle au média

La couche MAC (Media Access Control) coordonne l'accès au support partagé permettant la communication de plusieurs appareils sur un canal sans fil commun. En outre, la couche MAC fournit le schéma d'adressage qui permet l'identification de ces différents appareils. Cette couche est principalement responsable de la résolution des conflits entre les appareils communicants de manière que le

nombre limité d'ondes radio puisse être utilisé de façon optimale entre les appareils communicants afin que les ressources radio limitées soient partagées efficacement et équitablement. La première version de la norme 802.11 a été influencée par le succès de l'Ethernet qui a été normalisé sous la référence 802.3. En fait, en termes d'accès au canal et d'adressage, la norme 802.11 est similaire à l'Ethernet. C'est pourquoi la norme 802.11 est souvent appelée Ethernet sans fil.[10] La couche MAC de 802.11 peut utiliser deux modes de fonctionnement :

- **Distributed Coordination Function (DCF).**

Cette fonction est utilisée dans le cadre du protocole IEEE 802.11 pour la gestion des accès au support de transmission partagé. En DCF, chaque station (ou nœud) surveille le canal de transmission pour détecter si celui-ci est occupé avant de transmettre des données. Si le canal est libre, elle attend un intervalle de temps aléatoire pour éviter les collisions avec d'autres stations. Si le canal est occupé, elle attend un temps aléatoire avant de réessayer.[10] [3] [9]

- **Point Coordination Fonction (PCF).**

Contrairement au DCF, le PCF est une fonctionnalité optionnelle du standard IEEE 802.11 qui est utilisée pour améliorer l'efficacité du contrôle d'accès au support de transmission dans les réseaux sans fil. Dans PCF, un point d'accès (AP) coordonne les transmissions des stations en leur accordant des périodes de transmission (sous forme de cadre de coordination) pendant lesquelles elles peuvent transmettre sans devoir attendre de se concurrencer avec d'autres stations. Cela peut être particulièrement utile pour les applications temps réel nécessitant un accès garanti au média, bien que son utilisation soit moins courante que DCF dans la pratique[10] [3] [9].

I.3.1 Distributed Coordination Function (DCF)

Carrier Sense Multiple Access (CSMA)

- **Mode filaire.**

Lorsqu'un émetteur envoie un signal sur le câble, il peut y lire en même temps la valeur qui y est effectivement présente. Si jamais la valeur lue est différente de celle que l'émetteur écrit, c'est qu'un autre émetteur est actif au même moment et qu'il y a collision. Cette écoute du signal sur le câble au moment de l'émission est à la base de la méthode d'accès CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access Collision Detection) bien connue d'Ethernet. CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) permet de détecter une collision et le cas échéant de retransmettre le paquet après un temps d'attente aléatoire[11][10].

- **Mode sans fil.**

Au niveau d'un émetteur, le signal qu'il envoie va être reçu avec une puissance très supérieure

à un signal venant de n'importe quel autre mobile. Un signal émis localement est reçu avec une puissance tellement sérieuse aux autres signaux qu'il les occulte complètement. Du point de vue d'un émetteur, il n'y a donc jamais de collision en radio. Evidemment le problème se pose au niveau du récepteur, où plusieurs signaux pourraient ainsi être reçus simultanément avec des puissances comparables. Dans la pratique, des collisions se produisent effectivement uniquement au niveau des récepteurs

[11][10]C. Avec Ethernet, l'idée est d'écouter l'état du canal avant d'émettre, si le canal est libre on pourrait faire la transmission de la trame (et si à ce moment-là nous détectons une collision, nous émettons la trame un peu plus tard, après une attente de durée aléatoire). Or que dans les réseaux sans fil on a pas la possibilité de faire l'écoute avant et pendant la transmission. En effet, si nous nous contentions d'attendre que le canal devienne libre pour émettre, alors si plusieurs mobiles étaient en attente d'émission, ils détecteraient tous le canal libre et mettraient au même moment. Il y aurait collision au récepteur et il faudrait attendre que le délai imparti pour le retour de l'acquittement soit écoulé pour s'en rendre compte, ceci pourrait être relativement long

[11][10]. L'idée retenue pour 802.11 est donc, lorsque le canal devient libre, d'attendre une période de durée aléatoire supplémentaire appelée backoff avant d'émettre. Ce mécanisme s'applique lorsque le canal devient libre aussi bien après une de nos propres émissions qu'après toute autre émission

[11][10]. La Figure I.3 Montre le fonctionnement de CSMA/CA.

Lorsque le canal devient libre, avant toute chose, il faut qu'il le reste pour une période DIFS (DCF Inter-Frame Space). Si le canal est resté libre durant toute cette période, alors les mobiles qui veulent émettre choisissent un backoff aléatoire exprimé en un nombre de time slots d'une durée fixe, Le backoff est choisi au hasard dans un intervalle appelé Contention Window (CW) qui est par défaut [0;31]; avec un time slot de 20 microseconde, le backoff va donc normalement être compris entre 0 et 620 microseconde

[11][10]. Il faut noter que le temps de pause qui sépare un paquet de données de son acquittement est appelé SIFS (Short Inter-Frame Space) et qu'il est plus court que DIFS. Le mobile en période de differring ne pourra reprendre la décrémentation de son backoff que si le canal est à nouveau libre pendant DIFS. Le fait que SIFS soit plus court empêche que la décrémentation ne reprenne de manière inopportune entre les données et leur acquittement

[11][10]. L'intervalle de backoff limite les risques de collision mais ne les supprime pas complètement. Aussi, si une collision se produit quand même (détectée grâce à l'absence d'acquittement), un nouveau backoff va être tiré au hasard. Mais à chaque collision consécutive, la taille de la fenêtre va doubler afin de diminuer les chances que de telles collisions se répètent. La borne inférieure de la CW (Contention Window) est toujours zéro, et la borne supérieure (dont les valeurs au-

torisées par la norme ne sont que des puissances de 2 moins 1) va évoluer entre les valeurs aCW_{min} et aCW_{max} définies par la norme. La borne supérieure de la fenêtre est réinitialisée à aCW_{min} lorsqu'un paquet a été transmis correctement (ou lorsque les timers de réémissions expirent)(Voir la Figure (Voir la Figure I.3))[11][10].

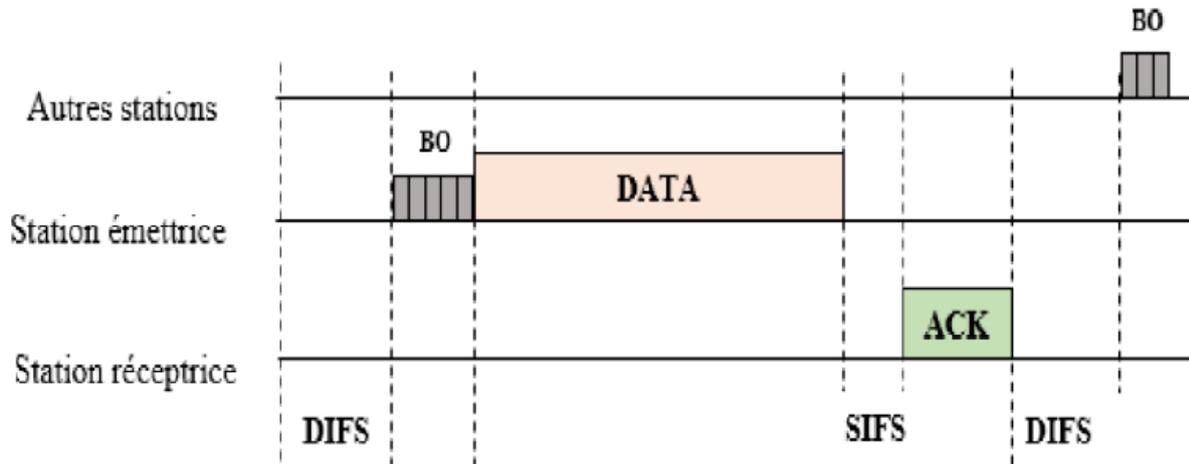


FIGURE I.3 – CSMA/CA

Problèmes avec méthode CSMA/CA

Nous avons vu que le mécanisme CSMA/CA cherche à éviter les collisions en écoutant l'activité sur le canal et en choisissant un délai aléatoire supplémentaire avant l'émission. Mais il existe une famille de configuration où ce mécanisme est insuffisant. Il s'agit du problème des nœuds cachés (Figure I.4) et problème des nœuds exposés (Figure I.7) ou deux émetteurs qui ne peuvent pas du tout s'entendre (en général à cause d'un obstacle) veulent atteindre un même récepteur. Comme dans cette configuration un émetteur ne détecte jamais l'activité de l'autre, il croit que le canal est toujours libre et émet dès qu'il a des données disponibles. Les chances de collisions à répétition au niveau du récepteur sont très élevées[3].

- **PROBLÈME DES NOEUDS CACHÉS.**

Dans le cadre prévu par 802.11, le problème des nœuds cachés n'apparaît que dans une configuration comme celle de la Figure I.4, où deux mobiles isolés l'un de l'autre, utilisant une même fréquence et attachés à une même station de base veulent émettre vers cette dernière en même temps. Dans ce contexte, le mécanisme de RTS/CTS est efficace. Dans un réseau ad hoc basé sur 802.11, les mobiles devront travailler sur la même fréquence s'ils veulent permettre une connectivité complète du réseau. De ce fait, les situations de nœuds cachés vont être beaucoup plus nombreuses et plus fréquentes. La figure I.5 donne un exemple de chaîne à quatre sauts. A l'instant considéré, les mobiles B et D, qui ne s'entendent pas du tout, veulent émettre. Il va

donc y avoir collision au niveau du nœud C. Attention, il faut bien noter que sous la plupart des simulateurs cette configuration ne se produira jamais car les zones de détection de porteuse étant parfaitement circulaires et d'un rayon double de la zone de communication, B se trouverait dans la zone de détection de porteuse de D et réciproquement. Mais dans la réalité, l'expérience a montré que ce type de collision était tout à fait possible. La Figure I.6 quant à elle, présente une configuration encore plus complexe. Là encore, de nombreuses situations de collisions se présentent, du fait de l'utilisation par tous les nœuds d'une seule et même fréquence. Les communications désirées sont (A -> B), (D -> E), (C -> F) et (H -> G). Si ces transmissions avaient lieu en même temps, des collisions entre les données pourraient se produire en B et en E, et, suivant la longueur des paquets, l'acquittement renvoyé par F pourrait provoquer une collision en G avec les données venant de H. Ces constatations tendraient à nous faire penser que l'utilisation des RTS(Request To Send)/CTS(Clear To Send) serait la solution à ces problèmes[10].

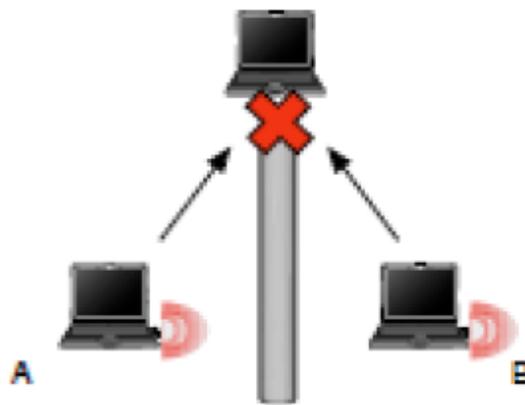


FIGURE I.4 – noeud cachée

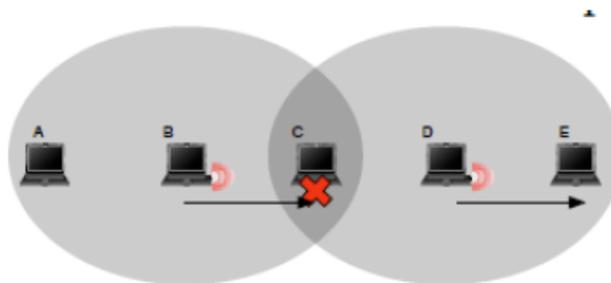


FIGURE I.5 – Noeuds cachés dans une chaîne

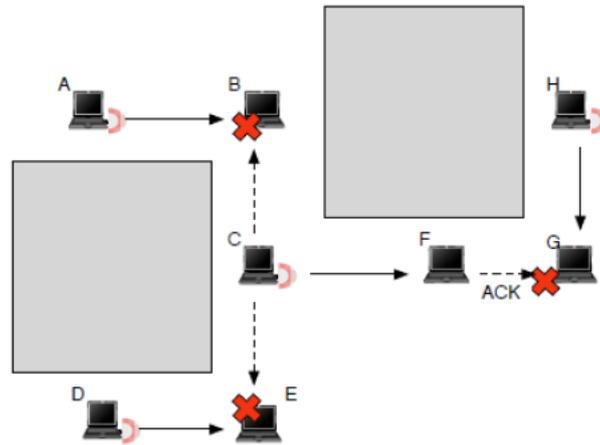


FIGURE I.6 – Multiples noeuds cachés

- **PROBLÈME DES NOEUDS EXPOSÉS.**

Le problème des nœuds exposés apparaît dans des configurations comme celle présentée sur la Figure I.7. Ici, les nœuds B et C voudraient émettre respectivement vers A et D. En suivant le mécanisme de la DCF, celui qui a tiré le plus petit backoff va accéder au canal et envoyer son paquet, alors que l'autre détectera la porteuse du premier, et entrera en période de deferment. Pourtant, si B et C émettent en même temps, le signal de B au niveau de A serait largement supérieur à celui de C et suffisant pour une réception correcte. La situation serait l'inverse au niveau du nœud D, qui recevrait correctement le paquet de C, malgré le léger bruit venant de B. Dans cette situation, la DCF limite donc inutilement la bande passante totale du réseau. On peut noter que certains travaux s'intéressent au problème, notamment qui propose l'utilisation d'un mécanisme de parallèle RTS pour le résoudre en partie[10].



FIGURE I.7 – noeud exposé

Le mécanisme RTS / CTS

Il s'agit d'une version améliorée du protocole CSMA with Collision Avoidance (CSMA/CA), qui est elle-même une variante du CSMA/CD. Avec le CSMA/CA, lorsqu'une station émet un paquet (en suivant la logique CSMA), elle attend en retour un accusé de réception (ou acknowledgment, noté ACK). Celui-ci a pour but de s'assurer que le paquet est bien arrivé à destination et qu'aucune collision n'a eu lieu. Le mode DCF du 802.11 repose sur ce principe avec quelques éléments

supplémentaires

[3]. La Figure I.8 Montre le fonctionnement de RTS / CTS.

Avant d'émettre un paquet de données, en mode DCF, la station WiFi attend un silence radio d'une durée prédéfinie (le Distributed Inter Frame Space, DIFS), suivi d'un délai d'attente supplémentaire aléatoire. Pour l'instant, rien de neuf. Mais ensuite, au lieu d'émettre un paquet de données, la station envoie un minuscule paquet dénommé Request To Send (RTS), c'est-à-dire « demande la permission d'envoyer un paquet ». Ce paquet indique, entre autres, une estimation du temps que prendra l'émission du paquet de données. La station réceptrice renvoie alors aussitôt un paquet (CTS) pour donner son autorisation à la station émettrice. En répondant après un très bref délai appelé le Short Inter Frame Space (SIFS), bien inférieur au DIFS, on est assuré qu'aucune autre station n'aura la mauvaise idée d'envoyer un paquet entre le RTS et le CTS. Le CTS contient lui aussi la durée estimée d'émission du paquet de données afin de prévenir toutes les autres stations à proximité qu'un paquet de données va être envoyé et qu'elles doivent donc attendre pendant la durée indiquée avant de tenter de prendre la parole. Une fois le CTS reçu, la station émettrice attend un bref délai (SIFS) et envoie son paquet de données. Une fois ce paquet correctement reçu et encore après un délai SIFS, la station réceptrice envoie un ACK. Celui-ci a pour but d'assurer à l'émetteur que le paquet est bien arrivé et qu'aucune collision n'a eu lieu. DCF propose que chaque station écoutant une trame RTS ou CTS initialise une variable NAV (Network Allocation Vector) avec la durée de la transmission. En d'autres termes, la variable NAV indique la durée où le canal est pris

[3]. Notons que ce mécanisme n'est valable que pour le trafic unicast, les paquets de broadcast ou de multicast sont envoyés sans RTS, sans CTS et sans ACK. Lorsqu'une station est connectée à un AP (mode Infrastructure, Figure I.1) et qu'elle émet un paquet en broadcast ou multicast, elle l'envoie en réalité uniquement à cet AP, selon le principe unicast. L'AP se charge ensuite de relayer le paquet à ses destinataires, en broadcast ou multicast

[3]. Avec le mécanisme RTS/CTS, on peut éviter la majorité des collisions plutôt que de les détecter après qu'elles ont eu lieu. En contrepartie, on perd une partie de la bande passante avec les paquets de contrôle RTS, CTS et ACK. C'est l'une des raisons pour lesquelles le débit réel en 802.11 est bien inférieur au débit théorique (c'est-à-dire le débit au niveau physique) : le CSMA/CA et le mécanisme RTS/CTS induisent des pertes importantes de débit au niveau de la couche MAC

[3].

Inconvénients DCF

- Le partage des ondes avec la stratégie DCF est simple et efficace lorsqu'il y a peu d'équipements communiquant en même temps. S'ils sont nombreux, le débit peut chuter considérablement. En outre, si une station communique à bas débit, elle ralentit toutes les autres

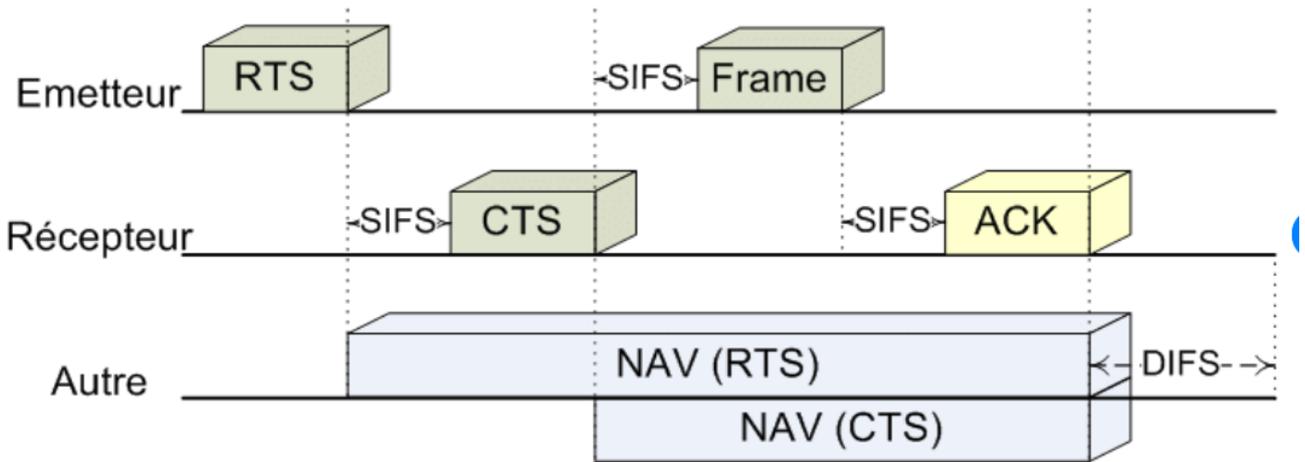


FIGURE I.8 – Mécanisme RTS CTS

[10] [3] [9].

- Puisque chaque station doit attendre le silence pour communiquer, la présence d'une interférence continue peut interrompre 100 pour cent du trafic. Ceci peut arriver à proximité d'un équipement industriel, d'un four à micro-ondes en fonctionnement, voire à cause d'un brouillage volontaire [10] [3] [9].
- Le mécanisme CSMA est par nature non déterministe, c'est-à-dire qu'il ne permet pas de garantir le moindre temps de transit puisqu'il repose sur un mécanisme aléatoire. Ceci n'est pas gênant lorsqu'on transmet des données « asynchrones » comme des courriels, par exemple, car la fluidité du transfert n'a pas d'importance. En revanche, si l'on souhaite transférer des données « synchrones » comme de la voix ou de la vidéo, par exemple, la fluidité est essentielle et le CSMA/CA peut devenir insuffisant [10] [3] [9].

I.3.2 Description du mode PCF

La deuxième stratégie de partage des ondes radio s'appelle la fonction de coordination par point (Point Coordination Function, PCF). Toutes les stations sont reliées (sans fil) à un point d'accès (AP) qui s'occupe de distribuer la parole à chacun. Par nature, cette stratégie n'est donc pas possible en mode Ad Hoc pour lequel les stations sont connectées directement entre elles sans passer par un AP (Figure I.1). Puisqu'un AP s'occupe de distribuer la parole, il n'y a plus de collision possible et le temps de latence est donc garanti. En anglais, on dit que ce système est Contention Free (CF), c'est-à-dire libre de toute dispute

[9][10] [3] . Pour reprendre l'analogie de la salle de réunion, cela revient à avoir un organisateur dont le rôle est de coordonner les communications entre les différentes personnes dans la salle. L'AP se tourne successivement vers chacune des stations et lui alloue un temps de parole plus ou moins

long, grâce à une requête CF-Poll1. Si la station accepte de prendre la parole, elle doit immédiatement acquiescer avec un paquet CF-ACK. Elle peut alors émettre un ou plusieurs paquets pendant cette période. Si elle n'a toujours rien émis au bout d'un court intervalle appelé le PCF Inter Frame Space (PIFS), alors l'AP passe à la station suivante. Les autres stations attendent patiemment.

[9][10] [3] Le mode PCF permet ainsi de diviser le temps de parole plus équitablement entre les stations et surtout de façon plus fluide et déterministe : ce mode est donc intéressant pour transférer des données synchrones, telles que des communications multimédias[9][10] [3] .

- Le partage du média avec les modes DCF et PCF ne permet pas de prévoir l'allocation du temps de parole, ce qui est pourtant nécessaire aux exigences QoS. Deux nouveaux modes, utilisables indépendamment des standards de communication, 802.11g, ou 802.11n draft par exemple, sont ajoutés. Ils sont basés sur une fonction de coordination baptisée HCF (Hybrid Coordination Function), elle-même extension des modes DCF et PCF [3] [9].

I.3.3 Hybrid Coordination Function(HCF)

Ce mode est une amélioration du PCF. Ici, l'autorisation d'émettre est distribuée par un coordonnateur hybride (HC - Hybrid Coordinator), typiquement le point d'accès. Les classes de trafic (TC) sont également utilisées. L'alternance du PCF entre les différentes périodes est maintenue. Durant la phase Contention Period (CP), les stations fonctionnent en mode EDCA. Cependant, la phase Contention Free Period (CFP) est transformée en Controlled Access Phase (CAP), période durant laquelle le HC garde le contrôle du support. Ce dernier prend l'initiative de passer en période CAP, lorsqu'il a besoin d'envoyer ou de recevoir des trames. Il garde une mainmise permanente sur la circulation du trafic. Par exemple, durant une phase EDCA(Enhanced Distributed Channel Access), les stations lui envoient l'état de leur file d'attente, par classe de trafic. Il choisira ensuite d'autoriser une émission, en fonction des informations collectées précédemment. La possibilité d'envoi d'informations par une série TXOP est conservée. Ce fonctionnement autorise une grande précision dans la gestion de la qualité de service. Le point d'accès HC doit pouvoir gérer au moins plusieurs des 8 classes de trafic possibles. Pour autoriser une station à émettre, il peut non seulement tenir compte de cette classe, mais également de la longueur de la file d'attente de chacune sur le client. D'autres critères de choix sont, par exemple, d'éviter l'accumulation des temps de parole sur une station ou de réguler le débit, en évitant les à-coups (jitter). Le mode HCCA(Controlled Channel Access) est de mise en oeuvre complexe, pour un apport finalement pas si évident. Il est peu utilisé[3] [9].

I.3.4 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)

Ce premier mécanisme également appelé Contention-based Channel Access est équivalent au mode DCF. Le délai DIFS avant prise de parole est désormais qualifié d'Arbitration Inter Frame

Space (AIFS). Sa durée est au moins égale à son prédécesseur. Pour rendre un paquet prioritaire, il est associé à une valeur d'AIFS plus courte. Chaque AIFS est associé à une fenêtre de contention (CW - Contention Window) spécifique. La WiFi Alliance a associé une certification à ce fonctionnement : WiFi Multimedia (WMM). Il n'y a donc pas de certification associée à 802.11e dans son ensemble, mais seulement au mode EDCA[3][9].

I.3.5 HCF Controlled Channel Access (HCCA)

Ce mode est une amélioration du PCF. Ici, l'autorisation d'émettre est distribuée par un coordinateur hybride (HC - Hybrid Coordinator), typiquement le point d'accès. Les classes de trafic (TC) sont également utilisées. L'alternance du PCF entre les différentes périodes est maintenue. Durant la phase Contention Period (CP), les stations fonctionnent en mode EDCA. Cependant, la phase Contention Free Period (CFP) est transformée en Controlled Access Phase (CAP), période durant laquelle le HC garde le contrôle du support. Ce dernier prend l'initiative de passer en période CAP, lorsqu'il a besoin d'envoyer ou de recevoir des trames. Il garde une mainmise permanente sur la circulation du trafic. Par exemple, durant une phase EDCA, les stations lui envoient l'état de leur file d'attente, par classe de trafic. Il choisira ensuite d'autoriser une émission, en fonction des informations collectées précédemment. La possibilité d'envoi d'informations par une série TXOP est conservée. Ce fonctionnement autorise une grande précision dans la gestion de la qualité de service. Le point d'accès HC doit pouvoir gérer au moins plusieurs des 8 classes de trafic possibles. Pour autoriser une station à émettre, il peut non seulement tenir compte de cette classe, mais également de la longueur de la file d'attente de chacune sur le client. D'autres critères de choix sont, par exemple, d'éviter l'accumulation des temps de parole sur une station ou de réguler le débit, en évitant les à-coups (jitter). Le mode HCCA est de mise en oeuvre complexe, pour un apport finalement pas si évident. Il est peu utilisé.[3][9].

I.4 La couche physique

La couche physique du Wi-Fi est chargée de la modulation des ondes radio et de la configuration de la signalisation pour la transmission des données. Elle offre plusieurs approches de codage de l'information, notamment DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum), FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum), IR(Infrared) et OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Toutes ces technologies permettent d'atteindre des débits compris entre 1 Mbps et 2 Mbps, constituant les premières avancées du Wi-Fi en termes de performances de connectivité sans fil.

I.4.1 DSSS

Chipping

La modulation DSSS étale le spectre du signal en envoyant une séquence de plusieurs bits (chips) pour chaque bit d'information. Cela permet une meilleure résistance au bruit et la correction d'erreurs de transmission grâce à la redondance. Contrairement au FHSS, il n'y a pas de saut de fréquence. Le 802.11 définit 14 canaux de 22 MHz dans la bande 2,4 GHz pour le DSSS, l'émetteur et le récepteur devant s'accorder sur un canal fixe[9].

La modulation CCK(Complementary Code Keying)

Le standard 802.11b a amélioré la modulation DSSS du WiFi avec le HR-DSSS, utilisant la modulation Complementary Code Keying (CCK) plutôt que le code de Barker. Cela permet d'atteindre des débits de 5,5 Mb/s et 11 Mb/s grâce à l'utilisation de 64 codes complémentaires de 8 bits, transportant 6 bits d'information par code. Cette solution est mieux adaptée en intérieur et à courte distance, mais souffre davantage des interférences d'autres réseaux sans fil comme le Bluetooth. Le 802.11b implémente aussi un mécanisme d'adaptation automatique du débit en fonction de la distance[9].

I.4.2 FHSS

La modulation FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) a été inventée en 1942 par Hedy Lamarr et George Antheil. Elle divise une large bande de fréquences en multiples canaux, puis fait sauter la communication d'un canal à l'autre selon une séquence convenue, rendant les communications difficiles à intercepter. Bien que le FHSS offre aussi une résistance aux interférences et permette à plusieurs communications de coexister sur la même bande, ces avantages ne sont pas exploités dans la version 802.11 d'origine qui utilisait la bande 2,4-2,48 GHz découpée en 79 canaux de 1 MHz avec une modulation GFSK pour des débits de 1 à 2 Mb/s[9].

I.4.3 IR

La technologie infrarouge permet d'établir des connexions sans fil sur de courtes distances, généralement de quelques mètres, avec des débits pouvant atteindre plusieurs mégabits par seconde. Cette solution est largement répandue pour des applications de domotique, comme les télécommandes, mais elle reste sensible aux interférences lumineuses.

La modulation utilisée sur ces liaisons infrarouges est la PPM (Pulse Position Modulation). Celle-ci consiste à transmettre des impulsions à amplitude constante, en codant l'information dans la po-

sition temporelle de ces impulsions. Grâce à cette technique, des débits de 1 à 2 Mbit/s peuvent être atteints sur ces liens infrarouges[9].

I.4.4 OFDM

La technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) a été retenue par l'IEEE pour accroître les débits au-delà des 11 Mbps initiaux du Wi-Fi. Développée dans les années 60, cette approche consiste à diviser le canal de transmission en de multiples sous-canaux. Le signal est ainsi décomposé en sous-porteuses traitées individuellement par une transformation de Fourier (FFT) pour éviter les interférences. Cette utilisation optimale de la bande de fréquence, alliée à une meilleure résistance aux interférences, a permis des améliorations significatives des performances du Wi-Fi. L'introduction d'un délai d'attente entre les envois de symboles (Guard Interval) a également contribué à réduire les problèmes de multi trajets. L'évolution de ce paramètre a ensuite permis d'accroître davantage les débits possibles (Voir la Figure I.9)[3].

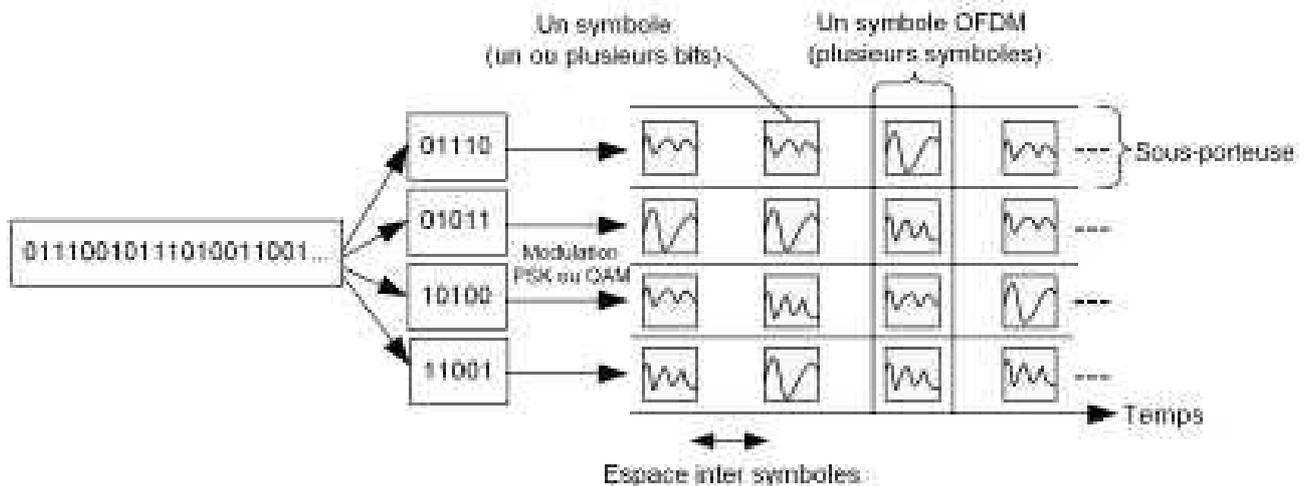


FIGURE I.9 – La modulation OFDM.

I.5 Conclusion

Pour conclure, ce chapitre a approfondi notre compréhension de la norme 802.11, qui constitue le cœur des réseaux locaux sans fil. En examinant en détail son architecture, son mode de fonctionnement et son évolution, nous avons pris conscience de l'importance cruciale de cette norme dans le paysage de la connectivité moderne. Nous avons également mis en lumière son influence sur les infrastructures de communication et les opportunités qu'elle offre pour répondre à la demande croissante de mobilité et de connectivité dans notre société contemporaine.

CHAPITRE

II

NOUVELLES GÉNÉRATIONS DE NORMES

II.1 Introduction

Le Wi-Fi s'est imposé comme une technologie essentielle dans nos vies, accompagnant la majorité de nos usages numériques. Face à cette omniprésence, chaque nouvelle génération de normes, du Wi-Fi 5 au Wi-Fi 7 en développement, repousse sans relâche les limites techniques pour atteindre des débits toujours plus élevés. Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail les caractéristiques de ces nouvelles normes Wi-Fi.

II.2 La norme 802.11 ac

L'IEEE 802.11ac est l'une des normes qui vise à supporter un très haut débit (VHT) avec un taux de données allant jusqu'à 7 Gbps dans la bande inférieure à 6 GHz. En particulier, la norme prévoit un débit de contrôle d'accès au médium (MAC) maximal d'au moins 500 Mb/s pour un seul utilisateur, et d'au moins 1 Gb/s dans le cas de plusieurs utilisateurs.[5].

Cette génération de WLAN 802.11 supporte aussi la transmission Down-Link Multi-User Multiple-Input Multiple-Output (DL-MU-MIMO). [29]

Plusieurs modifications ont été proposées pour atteindre des débits de l'ordre du gigabit, qui sont : la largeur de bande de canal plus large jusqu'à 160 MHz, un taux de modulation d'ordre

supérieur 256 Quadrature Amplitude Modulation (256 QAM), et le support de multiples (jusqu'à 8) flux spatiaux utilisant des techniques Multiple-Input Multiple-Output (MIMO).[5] et l'agrégation de canaux statiques et dynamiques.

L'amendement 802.11ac est développé pour répondre à différents types de modèles d'utilisation. Les principales catégories sont l'affichage sans fil, la distribution à domicile de contenu HDTV (High Definition Television) et autres, le téléchargement et le téléversement rapides de gros fichiers vers/ depuis des serveurs, le trafic de liaison arrière, les déploiements sur campus et auditorium, et l'automatisation des lignes de production. Il faut noter que les stations 802.11ac sont compatibles avec les appareils hérités[5] (voir la figure II.1).

Feature/IEEE standard	802.11b	802.11g/a	802.11n	802.11ac
Maximum data rate per stream (Mb/s)	11	54	>100	>500 (Assuming 80 MHz channels)
Frequency band	2.4 GHz	2.4 GHz/5 GHz	2.4 GHz and 5 GHz	5 GHz
Channel width (MHz)	20	20/20	20 and 40 (40 is optional)	20,40,80, 160, and 80+80 (last two are optional)
Antenna technology	Single-input single-output (SISO)	SISO	Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)	MIMO/MU-MIMO
Transmission technique	Direct sequence spread spectrum (DSSS)	DSSS and orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)	OFDM	OFDM
Maximum number of spatial streams	1	1	4	8
Beamforming-capable	No	No	Yes	Yes
Date ratified by IEEE	1999	2003/1999	2009	Expected 2014

FIGURE II.1 – Comparaison des normes IEEE802.11

II.2.1 Utilisation de canneau

Le standard 802.11ac apporte des avancées significatives en termes de canalisation et de techniques de modulation pour optimiser l'efficacité des communications sans fil. Il prend en charge des largeurs de canal de 20, 40, 80 et éventuellement 160 MHz, permettant un débit de données plus élevé. Les canaux plus larges que 20 MHz sont divisés en sous-canaux primaires et secondaires, assurant la compatibilité ascendante et la coexistence avec les périphériques hérités. La détection de porteuse est principalement effectuée sur le sous-canal de 20 MHz pour éviter les interférences, avec des niveaux de sensibilité améliorés pour les sous-canaux primaires et secondaires par rapport aux normes précédentes.

De plus, le schéma de modulation utilisé, la Multiplexage par Répartition Orthogonale des Fréquences (OFDM), utilise efficacement la bande passante disponible en répartissant les données sur plusieurs sous-porteuses. Dans un canal de 20 MHz, l'OFDM utilise 64 sous-porteuses, dont certaines sont

réservées à des fins de calibration et de synchronisation, réduisant légèrement la capacité de transport de données effective. Cependant, la capacité de l'OFDM à atténuer les interférences entre les canaux adjacents améliore la fiabilité globale de la transmission. Ainsi, grâce à une combinaison de prise en charge de canaux plus larges et de modulation OFDM, le 802.11ac atteint des débits de données plus élevés et une efficacité spectrale améliorée, en faisant une avancée majeure dans la technologie des réseaux sans fil (Voir la figure II.2)[19].

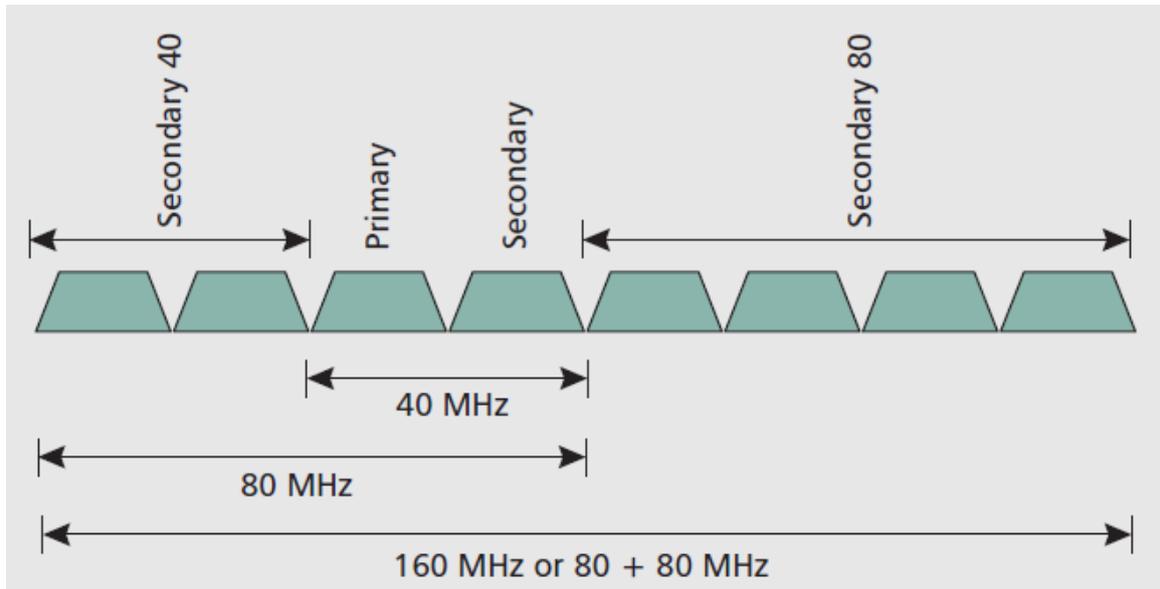


FIGURE II.2 – Sélection de canal primaire et secondaire

II.2.2 MIMO

Les techniques de transmission sans fil SU-MIMO (MIMO à utilisateur unique) et MU-MIMO (MIMO multi-utilisateur) sont fondamentales dans les normes IEEE 802.11, telles que 802.11n et 802.11ac. Le SU-MIMO exploite plusieurs antennes pour émettre et recevoir des signaux, améliorant ainsi la capacité et la fiabilité de la transmission. En utilisant des codes espace-temps, il offre des gains de diversité et de multiplexage significatifs, ce qui renforce la fiabilité et augmente la capacité de liaison. Chaque station multi-antennes communique avec un seul utilisateur à la fois, avec des transmissions orthogonales dans le temps, garantissant une efficacité accrue.

En revanche, le MU-MIMO permet à plusieurs stations, chacune équipée potentiellement de plusieurs antennes, de transmettre ou de recevoir des flux de données indépendants simultanément. Cette technique peut servir plusieurs utilisateurs à antenne unique ou multi-antennes simultanément, sans contrainte de nombre de flux activés. La norme 802.11ac prend en charge jusqu'à quatre flux servant quatre utilisateurs différents simultanément ou jusqu'à quatre flux par utilisateur unique. Cependant, pour minimiser les interférences entre utilisateurs, le MU-MIMO requiert une connaissance de l'information d'état du canal CSI(Channel State Information) par tous les utilisateurs. Il utilise

des stratégies telles que la rétroaction et le précodage des données pour annuler les interférences entre utilisateurs au niveau du transmetteur, assurant ainsi une transmission efficace et fiable des données (Voir la figure II.3) [26].

II.2.3 Le beamforming

Le "Transmit Beamforming", ou formation de faisceau de transmission, est une technique spécifiée dans la norme IEEE 802.11ac. Elle permet à une station d'envoyer plusieurs flux de données simultanément à un seul utilisateur ou à plusieurs utilisateurs. La formation de faisceau consiste à diriger les signaux de manière plus précise en fonction des informations sur le canal, ce qui améliore la réception des données. Pour cela, la station qui envoie les données (comme un point d'accès Wi-Fi) doit d'abord collecter des informations sur le canal de chaque utilisateur en envoyant des signaux d'entraînement et en attendant leur réponse. Ces réponses sont utilisées pour calculer une matrice de direction qui permettra d'optimiser la transmission des données en les dirigeant vers les utilisateurs de manière plus efficace.

Le protocole de formation de faisceau proposé pour le 802.11ac fonctionne comme suit : avant chaque transmission formée de faisceau, le "beamformer" envoie une trame d'annonce de paquet de données nulles VHT NDP (Null Data Packet Announcement) qui contient les adresses de l'émetteur (AP) et de l'ensemble des "beamformées", ainsi qu'un numéro de séquence qui identifie l'annonce NDP VHT. Le but principal de cette annonce est de notifier à la station réceptrice qu'elle doit être prête à préparer une trame de rapport de formation de faisceau. Après un court espace inter-trame (SIFS), l'AP émet une trame NDP VHT afin de sonder le canal. En se basant sur la trame NDP, la station préparera les informations qui seront contenues dans le rapport de formation de faisceau. La trame NDP VHT a le même format que la VHT PPDU mais n'inclut pas de champ de données. Par conséquent, les récepteurs ciblés utilisent uniquement un préambule pour mesurer le canal entre l'AP et eux-mêmes (Voir la figure II.3) [5].

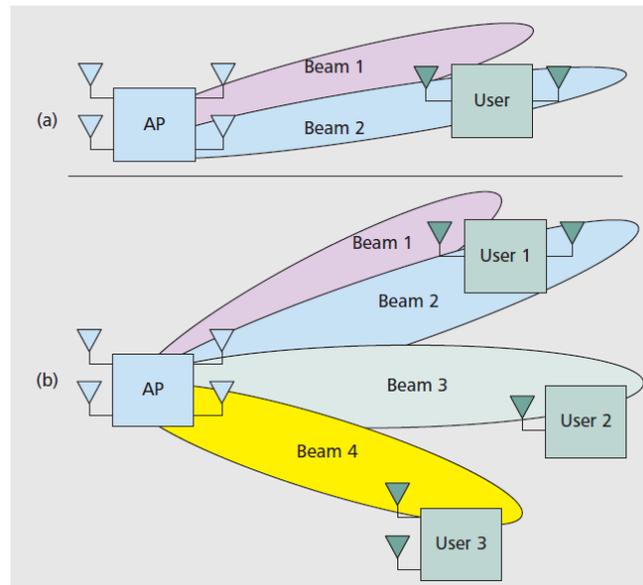


FIGURE II.3 – Divers concepts MIMO a) SU-MIMO beamforming ; b) downlin

II.2.4 Améliorations de l'agrégation de trames dans le cadre de la norme 802.11ac

Dans le cadre de la norme 802.11ac, des améliorations significatives ont été apportées à l'agrégation de trames au niveau de la couche MAC. Ces améliorations incluent l'introduction de différents schémas d'agrégation de trames, ainsi A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit) que des mécanismes de négociation de capacité pour des paramètres tels que la largeur de canal. L'un des éléments clés de ces améliorations est l'adoption obligatoire de l'agrégation de trames à travers les unités de données de contrôle d'accès au média agrégées A-MPDU, qui étaient déjà présentes dans la norme précédente, 802.11n. Dans le cadre de la norme 802.11ac, les A-MPDU sont optimisées en augmentant leur taille, permettant ainsi de regrouper plusieurs unités de données de contrôle d'accès au média (MPDU) en une seule unité de données de protocole de convergence PPDU (Physical Layer Convergence Procedure Protocol Data Unit). Cette consolidation des données améliore de manière significative l'efficacité de l'utilisation du canal et du contrôle d'accès au média[9].

II.2.5 Modulation 256-QAM et différentes MCS (Modulation and Co-ding Scheme)

La modulation consiste à faire varier les paramètres de phase et d'amplitude d'une onde porteuse pour transmettre un signal. En modulation QAM, on associe des séquences de bits (mots) à des couples phase-amplitude. Chaque sous-porteuse OFDM est ainsi modulée pour former un symbole contenant un mot de bits. Un "intervalle de garde" sépare ces symboles. Depuis 802.11n, cet intervalle peut être long (800ns) ou court (400ns), le court augmentant le débit mais pouvant parfois ne pas suffire à bien distinguer les symboles. Le rapport signal/bruit permet d'utiliser des modulations de plus en plus complexes pour atteindre des débits plus élevés. Ainsi, la norme 802.11ac introduit la

256-QAM, avec 16 valeurs possibles de phase et d'amplitude. soit 256 symboles représentant 8 bits chacun (voir la figure II.4), contre 6 bits par symbole en 64-QAM. Cela permet une augmentation de débit d'environ 33 pourcent. (voir la figure II.5).

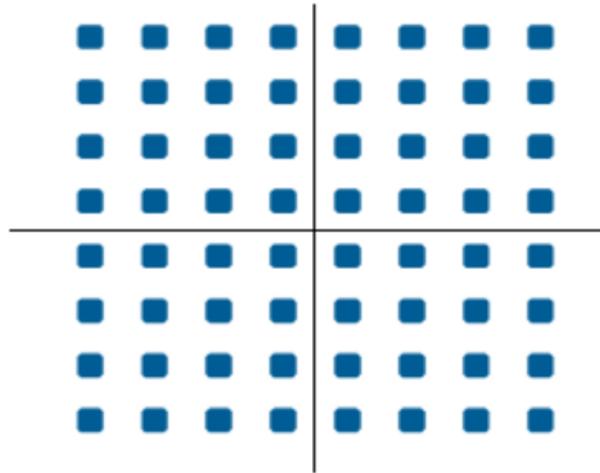


FIGURE II.4 – Diagrammes de constellation 64-QAM

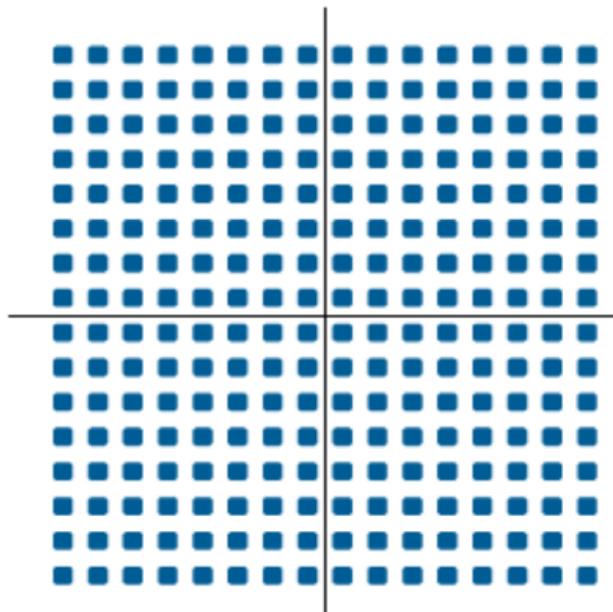


FIGURE II.5 – Diagrammes de constellation 256-QAM.PNG

La modulation 256-QAM, bien que permettant d'atteindre des débits très élevés, présente une plus grande sensibilité aux perturbations du canal de transmission. En effet, l'écart entre les symboles de cette modulation très dense est très faible, la rendant plus vulnérable aux interférences et aux défauts matériels. Pour compenser cette sensibilité accrue, l'utilisation de la 256-QAM nécessite un rapport signal sur bruit environ 5 dB supérieur à celui requis pour la 64-QAM, qui dispose d'un espacement plus important entre ses symboles. Cela signifie que le système doit disposer d'un meilleur rapport signal sur bruit pour pouvoir exploiter efficacement les avantages de la 256-QAM en termes

de débit, comparé à l'utilisation de la 64-QAM qui est plus robuste aux perturbations[23].

II.3 La norme 802.11 ax

Le Wi-Fi 6 apporte de nombreuses améliorations qui en font le protocole sans fil le plus performant à ce jour. Non seulement il améliore les performances globales, mais il est également conçu pour optimiser l'efficacité dans des situations réelles. De nouvelles fonctionnalités comme l'OFDMA, le MU-MIMO ascendant, le coloriage BSS et les nouveaux schémas de modulation interagissent pour permettre aux utilisateurs de bénéficier d'une connectivité stable sans engorgement du réseau ni dégradation des performances[4].

II.3.1 Fonctionnement dans les spectres 2,4 et 5 GHz

Alors que le Wi-Fi 802.11n permettait d'utiliser à la fois les bandes 2,4 GHz et 5 GHz, la norme 802.11ac ne fonctionnait que sur la bande 5 GHz. Le Wi-Fi 802.11ax, quant à lui, prend en charge les deux bandes de fréquences 2,4 GHz et 5 GHz, tout en offrant davantage de flux spatiaux. De plus, le Wi-Fi 802.11ax utilise des canaux de 20, 40 et 80 MHz, à l'instar du 802.11ac. L'ajout de la bande 2,4 GHz présente plusieurs avantages, notamment une plus grande portée et une meilleure couverture pour les objets connectés. Bien que cette bande soit sujette à davantage de bruit et de congestion, les améliorations d'efficacité apportées par le 802.11ax devraient permettre d'exploiter pleinement le potentiel de cette plage de fréquences[21].

II.3.2 OFDMA

La principale innovation du Wi-Fi 6 réside dans l'implémentation de la technologie OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) en liaison montante et descendante. Cette avancée permet à plusieurs utilisateurs d'émettre simultanément et de se partager la bande passante disponible sur un même canal, à la différence des normes précédentes qui utilisaient l'OFDM et le multiplexage temporel où un seul utilisateur pouvait transmettre sur toute la bande. Avec l'OFDMA, chaque utilisateur se voit attribuer une portion du spectre, appelée unité de ressource (RU), composée d'un sous-ensemble contigu de sous-porteuses (de 26 à 996). En plus de cette largeur spectrale, le type de modulation peut également varier d'un utilisateur à l'autre. Cela permet au point d'accès de s'adapter individuellement aux besoins de chaque client en termes de débit. Sur le plan temporel, les paquets de données ont une durée identique dans toutes les RU afin d'éviter les interférences, et sont transmis simultanément. Les utilisateurs ayant moins de données à envoyer que la longueur du paquet doivent compléter avec des bits supplémentaires. Cette technologie permet d'atteindre une

largeur de bande maximale de 160 MHz, pouvant accueillir jusqu'à 74 utilisateurs simultanés. Lorsqu'un seul utilisateur est actif, l'ensemble de la bande passante est alors attribué à cette unique unité de ressource[?](Voir la Figure II.6).

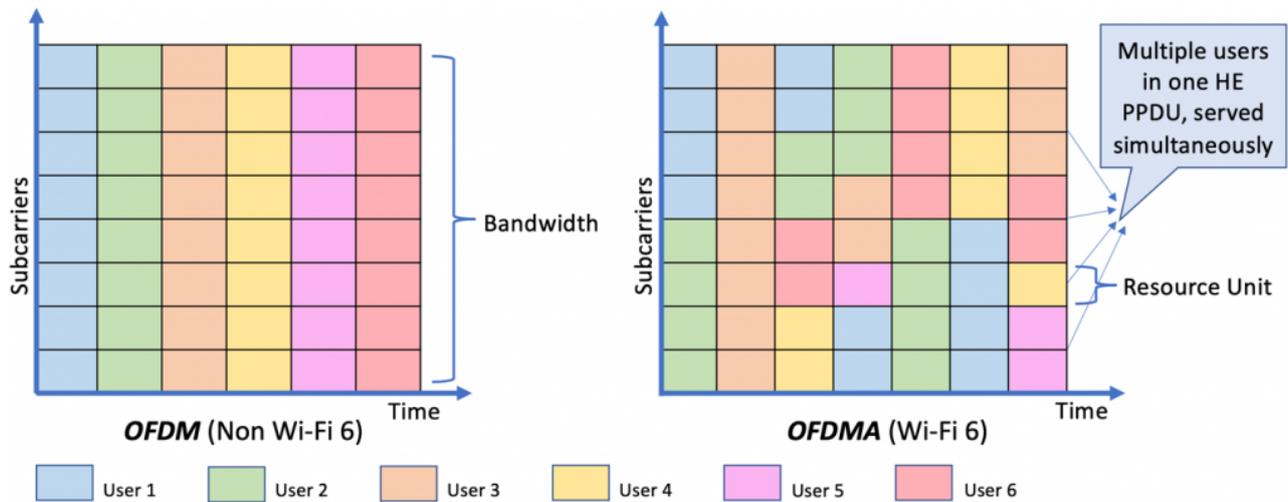


FIGURE II.6 – OFDMA dans la norme 802.11 ax

II.3.3 MIMO multi-utilisateur

La technologie MIMO multiutilisateur a été introduite dans la norme Wi-Fi 802.11n. Elle a permis d'augmenter les débits en permettant la transmission simultanée de plusieurs flux de données vers un seul utilisateur, grâce à l'utilisation de plusieurs antennes au point d'accès. Cependant, lorsque plusieurs utilisateurs devaient être servis, ces transmissions se faisaient de manière séquentielle, l'un après l'autre. La norme 802.11ac a ensuite amélioré cette approche en implémentant le MU-MIMO en liaison descendante. Cela permet d'alimenter plusieurs utilisateurs simultanément, en utilisant des antennes dédiées pour chacun d'eux. Cela augmente ainsi le débit global du réseau. Le MU-MIMO en liaison descendante repose sur le multiplexage spatial. Le réseau d'antennes du point d'accès est configuré de manière à former des faisceaux distincts dans la direction de chaque utilisateur. Ainsi, chaque station ne reçoit que les signaux qui lui sont destinés. La norme 802.11ax a repris et étendu cette fonctionnalité, en passant de 4 à 8 flux de données parallèles possibles. De plus, elle introduit pour la première fois le MU-MIMO en liaison montante. Plusieurs stations peuvent alors émettre simultanément vers le point d'accès. Cependant, sans multiplexage spatial, les signaux se mélangent lors de la propagation. Le point d'accès doit alors les séparer à l'aide de son réseau d'antennes pour les attribuer aux différents utilisateurs[28].

II.3.4 1024-QAM

La modulation en quadrature d'amplitude (QAM) permet d'augmenter l'efficacité de la transmission de paquets en modulant à la fois l'amplitude et la phase du signal. La norme 802.11ac a introduit la prise en charge de la modulation 256-QAM. Puis la norme 802.11ax est passée à une constellation encore plus dense, avec la modulation 1024-QAM. Dans des conditions optimales, où un seul client est situé à proximité du point d'accès, l'utilisation de la modulation 1024-QAM peut permettre de multiplier le débit par 2,5, atteignant ainsi 1,2 Gbit/s par flux spatial. Avec la modulation 256-QAM, le nombre de bits transmis par symbole OFDM était de 8. La modulation 1024-QAM fait passer ce nombre à 10 bits, soit une augmentation de 25 pourcent de l'efficacité spectrale. Cependant, cette plus grande densité de constellation nécessite un rapport signal sur bruit particulièrement élevé, car la marge d'erreur de la modulation 1024-QAM est très faible. Les progrès récents dans les technologies de filtrage numérique et les radios sans fil ont permis de concrétiser ces débits très élevés, même dans des scénarios de propagation moins favorables[?](Voir la Figure II.7).

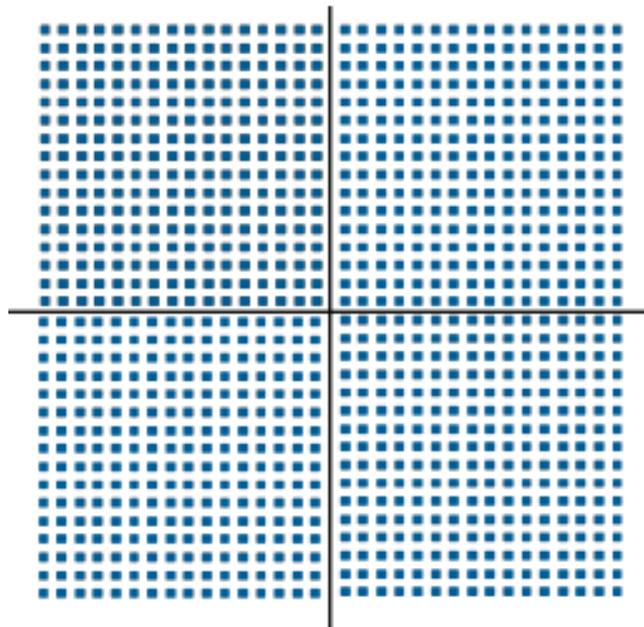


FIGURE II.7 – Diagramme de constellation : 1024-QAM.

II.3.5 BSS Color

Le mécanisme de coloration de réseau est une technique qui permet une utilisation plus efficace de la bande passante disponible. Il permet de différencier les transmissions provenant de différents ensembles de services de base (BSS) se déroulant sur le même canal, en leur attribuant une couleur. Cette couleur correspond à une valeur de 6 bits incluse dans le préambule de la couche physique. Un maximum de 63 couleurs différentes peut être utilisé, la couleur 0 indiquant que le mécanisme est

désactivé[4].

II.4 La norme 802.11 be

La norme 802.11be a été développée pour augmenter le débit maximal du Wi-Fi et améliorer ses performances en utilisant des bandes de fréquences plus larges (1 à 7,125 GHz). Le projet 11be a intégré des objectifs très ambitieux liés à des débits nominaux plus élevés, une meilleure efficacité spectrale, une meilleure atténuation des interférences et la fourniture de support pour les applications en temps réel RTA(Real-Time Application). Pour atteindre ces objectifs, le groupe de travail 802.11 a examiné environ 500 propositions provenant de différents domaines, associées à l'une des sept principales innovations du Wi-Fi 7. La norme intègre également la technologie Full Duplex, qui améliore l'efficacité des réseaux sans fil[12] (Voir la Figure II.8).

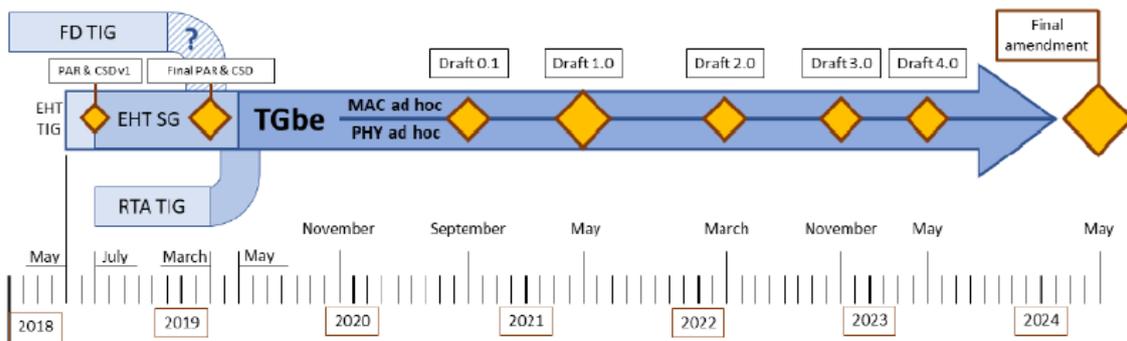


FIGURE II.8 – Chronologie du processus de normalisation du standard 11be

II.4.1 Fonctionnalités candidates de l'IEEE 802.11be

EHT PHY

Le Wi-Fi 7 fait évoluer la PHY des normes Wi-Fi précédentes en doublant la largeur de bande et le nombre de flux spatiaux (SS) dans le MU-MIMO, ce qui augmente le débit nominal de 2x2 à quatre fois. En introduisant des schémas de modulation et de codage (MCS) plus performants avec le 4K-QAM, le débit nominal augmente de 20 pourcent. Le Wi-Fi 7 peut ainsi atteindre des débits nominaux maximaux d'environ 46 Gbit/s, soit 4,8 fois plus que les 9,6 Gbit/s du Wi-Fi 6. La norme 11be, basée sur le 11ax, étend ces capacités en utilisant des bandes de fréquences plus larges (jusqu'à 320 MHz) et en augmentant le nombre de flux spatiaux en MU-MIMO jusqu'à 16. Un aspect révolutionnaire du PHY EHT est l'introduction d'un format de trame compatible en avant, facilitant l'intégration de nouvelles PHY et le support de différents formats dans le même réseau [12].

4K-QAM

L'augmentation de l'ordre de modulation par constellation entraîne des gains de débit de plus en plus faibles. Par exemple, le passage du 64-QAM de 802.11n (Voir la Figure II.4) au 256-QAM de 802.11ac (Voir la Figure II.7) a offert un gain de 33 pourcent, tandis que le 1024-QAM de 802.11ax (Voir la Figure II.7) n'a apporté qu'une augmentation de 25 pourcent. Le 4096-QAM (Voir la Figure II.9), utilisé dans le Wi-Fi 7, ne procure qu'un gain supplémentaire de 20 pourcent. Cependant, ces gains marginaux ont un coût élevé, car le rapport signal sur bruit (SNR) requis pour le 4096-QAM est d'environ 40 dB, un niveau difficile à atteindre dans les scénarios Wi-Fi typiques. Un SNR aussi élevé peut être obtenu grâce à la formation de faisceau (beamforming), ce qui le rend avantageux lorsque le point d'accès (AP) dispose de nombreuses antennes et ne dessert qu'un seul client avec peu d'antennes. Dans ces conditions, où les transmissions multi-utilisateurs (MU) ne sont pas possibles et où le nombre de flux spatiaux (SS) est faible, l'utilisation d'un ordre de modulation élevé devient le seul moyen d'augmenter le débit. C'est pourquoi le 4096-QAM est pris en charge en option par l'EHT (802.11be)[20].

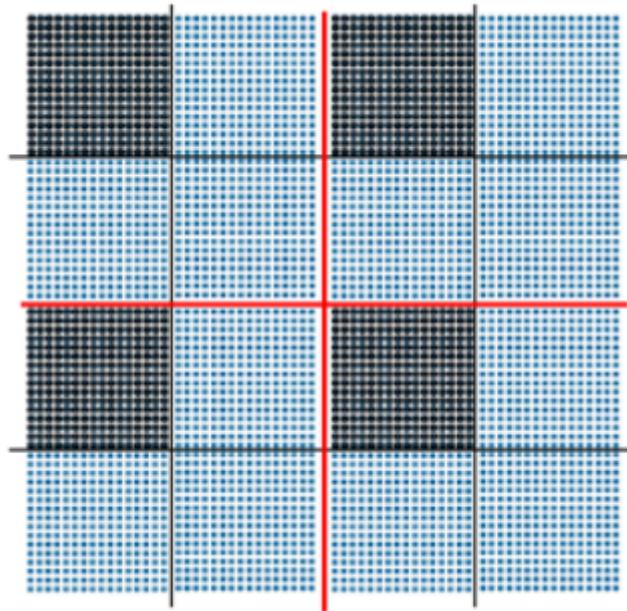


FIGURE II.9 – Diagramme de constellation 4096-QAM

Canneaux de 320 Mhz

Le standard 11be (Wi-Fi 7) introduit la possibilité d'utiliser des canaux beaucoup plus larges, allant jusqu'à 320 MHz, grâce à l'ouverture récente de la bande de fréquences 6 GHz, ce qui permet de doubler le débit nominal maximal par rapport à 11ax et d'améliorer les débits de données réels, notamment sur des distances modérées. En plus des canaux de 320 MHz, il prend en charge des combinaisons de canaux non contigus, comme 160+160 MHz [2], facilitant la coexistence des réseaux voi-

sins et permettant une utilisation efficace de la bande passante même sans spectre contigu disponible. Des options supplémentaires, telles que 240/160+80 MHz, sont également à l'étude. Cependant, dans des déploiements denses ou avec des appareils à puissance limitée, l'utilisation de canaux très larges peut être inefficace. Pour remédier à cela, 11be envisage l'agrégation de bandes multiples, permettant d'atteindre des largeurs de canal totales dépassant 320 MHz et offrant des débits extrêmement élevés[3].

MU-MIMO

Étant donné l'évolution actuelle et les exigences ambitieuses de la future norme 802.11be, de nombreux acteurs du secteur Wi-Fi prévoient d'augmenter significativement les capacités de multiplexage spatial des points d'accès. Le but serait ainsi de supporter jusqu'à seize flux spatiaux simultanés (Voir la figure II.10).

L'augmentation prévue des capacités de multiplexage spatial pour la norme 802.11be devrait permettre de doubler l'efficacité spectrale par rapport à la norme 802.11ax [4]. Cela maximiserait l'utilisation des débits élevés offerts par les connexions fibre optique jusqu'au domicile FTTH (Fiber To The Home) et tirerait parti de la propagation favorable dans les environnements intérieurs, où les réseaux Wi-Fi sont généralement installés.

Cependant, ces améliorations de performance pourraient être limitées par la surcharge causée par le processus de sondage de canal, essentiel pour obtenir des informations précises sur l'état du canal (CSI). Doubler le nombre de flux spatiaux tout en maintenant la procédure explicite d'acquisition de CSI définie dans 802.11ax pourrait poser des problèmes d'évolutivité.

Pour cette raison, la norme 802.11be envisage l'introduction d'une méthode de sondage de canal implicite, basée sur les pilotes envoyés par les stations et utilisant la réciprocité des canaux montant et descendant. Cette méthode nécessiterait toutefois que les points d'accès mettent en œuvre une procédure de calibration pour éviter les incompatibilités matérielles susceptibles de compromettre cette réciprocité des canaux[12].

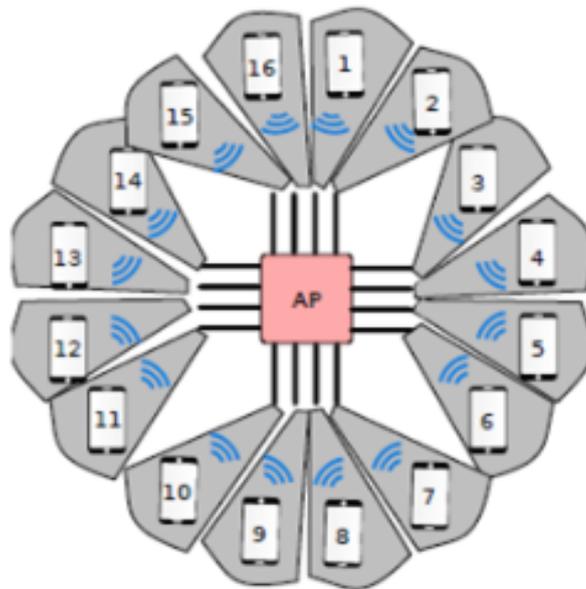


FIGURE II.10 – Un AP de wifi 7 supportant 16 antennes

Trame PHY

Le standard 802.11be doit adapter les formats de trame pour supporter de nouvelles fonctionnalités PHY. Dans les bandes de 5 GHz et 6 GHz, les trames Wi-Fi commencent avec le préambule hérité du 802.11a pour assurer la compatibilité descendante, incluant un champ d'entraînement court et un champ d'entraînement long utilisés pour la détection de trame et la synchronisation du récepteur. Le champ de signal hérité L-SIG(Legacy Signal) indique le MCS utilisé pour le signal suivant et la longueur de la trame, tandis que les versions Wi-Fi au-delà du 802.11n transmettent les valeurs réelles de MCS et de taille de trame dans les symboles suivants. Les versions 802.11n, 802.11ac et 802.11ax manipulent la modulation du symbole OFDM suivant le L-SIG pour différencier les formats de trame. Le standard 802.11be introduit un SIG universel U-SIG(User Signal) pour fournir des informations indépendantes de la version et assurer une compatibilité ascendante, et le champ EHT-SIG contient des informations spécifiques aux nouvelles fonctionnalités du 802.11be. De plus, les champs d'entraînement court et long EHT (STF et LTF(Long Training Field)) sont utilisés pour un accord fin en temps et en fréquence. Enfin, les canaux de 320 MHz nécessitent une nouvelle conception de rotation de phase pour s'adapter au plan de tonalité et aux perforations[?] (Voir la Figure II.11 et la Figure II.11).

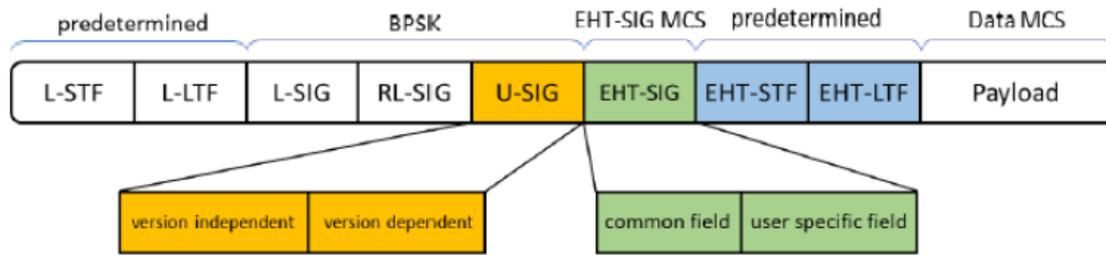


FIGURE II.11 – Le format de trame EHT

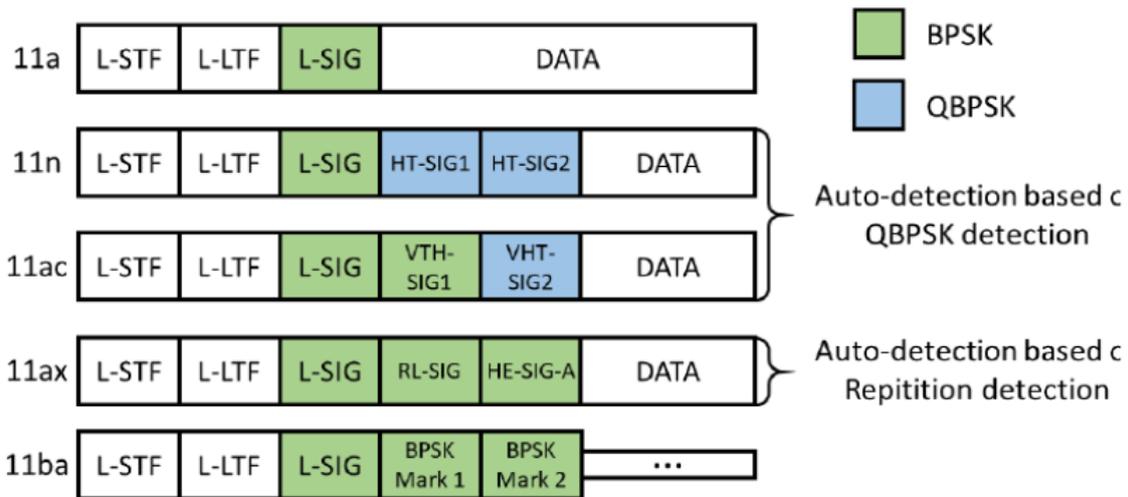


FIGURE II.12 – Détection automatique du préambule pour les trames héritées

II.4.2 OFDMA amélioré

Le 802.11be utilise une approche de planification similaire à celle du 802.11ax, où un point d'accès (AP) peut initier des transmissions MUE en DL ou en UL en utilisant l'OFDMA et/ou le MIMO. Une nouveauté du 802.11be réside dans la possibilité d'attribuer plusieurs unités de ressource (RU) à une seule station (STA), ce qui ajoute un nouveau degré de liberté en matière de planification. De plus, l'opération multi-liens peut nécessiter une synchronisation de planification[24](Voir la figure II.13).

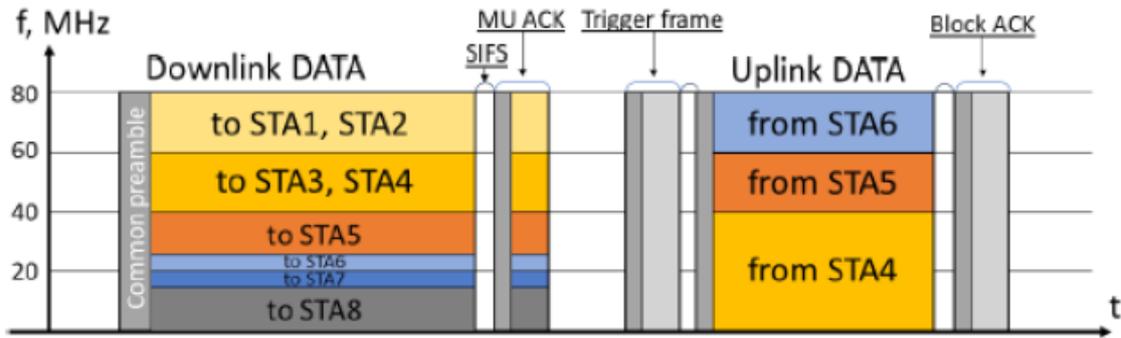


FIGURE II.13 – Exemple de transmission OFDMA MIMO dans le cadre de la norme 802.11be

Multi-RU

Le 802.11ax a introduit l'OFDMA dans le Wi-Fi, où les tons sont regroupés en unités de ressource (RU) dans chaque trame OFDMA, que l'AP peut attribuer à différentes stations (STA) pour des transmissions DL ou UL. Les RUs varient en taille, correspondant à des largeurs de bande allant de 20 MHz à 160 MHz/80+80 MHz. Le 802.11be permet l'attribution de plusieurs RUs par STA pour améliorer l'utilisation du spectre, malgré la complexité accrue de l'implémentation et de la planification. Pour optimiser ce processus, des propositions visent à limiter les combinaisons de RUs aux configurations offrant les meilleurs gains, en évitant notamment les petites RUs inefficaces [18] voir la Figure II.13.

II.4.3 Multi link operation (MLO)

Le Wi-Fi 7 a apporté une innovation révolutionnaire avec la prise en charge native de l'opération multi-liens, offrant à la fois des débits de données élevés et une latence extrêmement faible. Bien que les chipsets modernes puissent déjà utiliser plusieurs liens simultanément, ces liens sont indépendants, ce qui limite leur efficacité. La norme 11be vise à atteindre une synchronisation entre les liaisons qui permet une utilisation optimale des ressources du canal et qui évite les interférences dans les environnements denses [12].

II.4.4 Architecture multi-liens

Dans la norme 11be, un nouveau concept appelé Multi-Link Device (MLD) est introduit. Un MLD (Multi-Link Device) est un appareil EHT (Extremely High Throughput) capable en MLO (Multi-Link Operation) alors que les appareils hérité ou Legacy sont les appareils qui ne supportent que SLO (Single-Link Operation) appelé aussi SLD (Single-Link Device).

Un MLD est considéré comme un appareil affilié à plus d'une station ou chaque lien est considéré comme une station mono-lien, tant dit qu'un SLD est affecté à une seule STA.(voire la figure II.14)
Un MLD est classé en deux types des STA affiliées :

- Appareil multi-lien AP (AP MLD) : chaque STA affiliée est un AP.
- Appareil multi-lien non-AP (non-AP MLD) : chaque STA affiliée est une STA non-AP (client)[5].

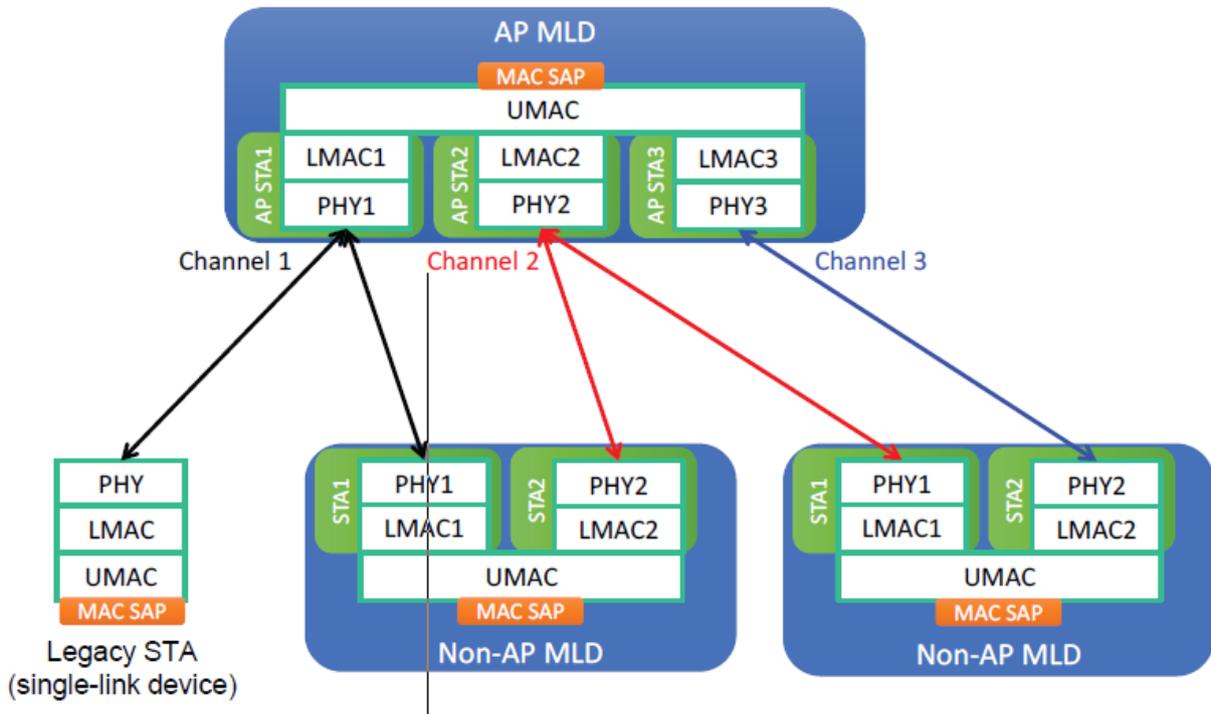


FIGURE II.14 – Architecture de système à liens multiples

Chaque STA reliée à un MLD est constituée de composants PHY et LMAC(Logical MAC). Le MLD possède un composant UMAC(Upper MAC) pour intégrer toutes ses STA reliées et offrir à la LLC(Logical Link Control) un point d'accès unique de service MAC SAP(Service Access Point). Une STA AP et toutes les STA non-AP qui lui sont associées forment un ensemble de services de base (BSS). un AP MLD peut interagir avec des MLD non-AP en établissant différents liens. Un MLD non-AP peut être connecté à plusieurs STA non-AP sur des canaux distincts, chaque STA étant associée à une STA AP de l'AP MLD. L'IEEE 802.11 utilise un identifiant de 4 bits, appelé TID(Traffic Identifier), pour classer les paquets selon différents niveaux de qualité de service (QoS) pour la transmission et la réception multi-lien. Cet identifiant permet de distinguer et de gérer le trafic en fonction des exigences spécifiques de service.

Dans MLO, le TID est utilisé pour identifier quel lien utiliser pour le trafic avec une QOS spécifique, On parle de TID vers lien.

Y a deux types de mappage des TID : mappage TID un-à-un et mappage TID un-à-plusieurs.

- Mappage un à un du TID par rapport à la liaison (Agrégation au niveau du flux) ou chaque TID est transmis uniquement si le lien dont il est dédié est libre. Ce type de mappage est bénéfique pour les TID haute priorité, car elle isole physiquement les ressources de liens associés des autres TID de priorité inférieure.
- Mappage un à plusieurs du TID par rapport à la liaison (Agrégation au niveau du paquet) ou chaque TID peut être mappé à un ensemble de plusieurs liens. Ce type de mappage est utilisé pour exploiter pleinement l'augmentation de débit et la diminution de la latence par MLO. (voire la figure II.15)

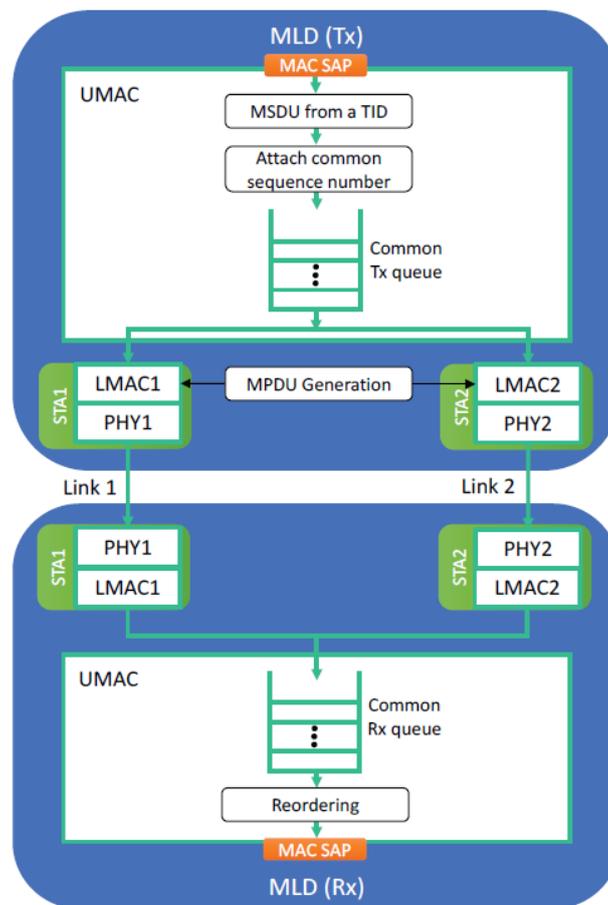


FIGURE II.15 – Architecture commune UMAC et de mise en file d'attente pour l'agrégation de liens au niveau des paquets

II.4.5 Accès multi-liens au canal

L'opération multi-liens offre à un Dispositif Multi-Lien (MLD) la capacité d'accéder au canal et de transmettre des données via plusieurs liens de manière asynchrone, couvrant différentes bandes de fréquences telles que 2,4/5/6 GHz. Bien que les fuites de puissance entre ces bandes soient minimes en raison de leur distance spectrale élevée, les appareils affiliés à un MLD peuvent encore interférer

les uns avec les autres, en particulier s'ils utilisent des canaux voisins. Cette interférence complique la transmission et la réception simultanées. Pour pallier ce problème, en plus de l'opération multi-liens asynchrone, des transmissions synchrones sont envisagées, bien que cela puisse entraîner une réduction du débit en raison d'un accès moins fréquent au canal. Une autre solution potentielle consiste à interdire la transmission pendant que le récepteur prévu est en cours de transmission, obligeant ainsi le MLD à arrêter la transmission dans les bandes voisines pour recevoir avec succès les données (Voir la Figure II.16)[27].

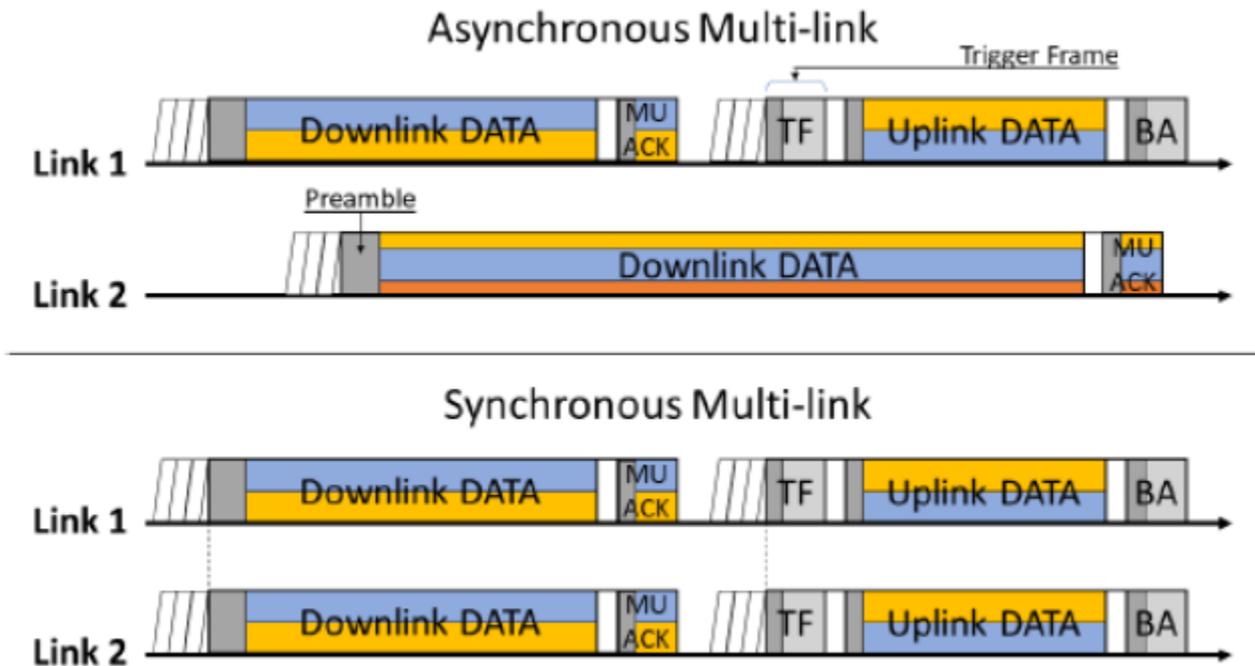


FIGURE II.16 – Mode de transmission Multi-Lien

II.4.6 Topologie des appareils MLO (Multi-Link Operation) dans le Wi-Fi 7

- Dispositifs de radio simple à liaisons multiples (MLSR) : Ces appareils disposent d'une seule interface radio et peuvent transmettre ou recevoir sur un seul lien à la fois. Bien qu'ils n'utilisent pas simultanément plusieurs liens, ils sont associés à tous les liens et peuvent activer MLO de différentes manières, par exemple en utilisant des fenêtres TWT (Target Wake Time) exclusives par lien.
- Dispositifs de radio simple à liaisons multiples améliorés (eMLSR) : Ces appareils peuvent écouter plusieurs liaisons à la fois, ce qui leur permet d'être toujours disponibles pour transmettre ou recevoir sur plusieurs liaisons préconfigurées associées.
- Dispositifs multi-radio multi-liaisons d'émission-réception non simultanés (NSTR-MLMR) :

Ces appareils peuvent transmettre ou recevoir simultanément sur plusieurs liaisons, mais pas les deux en même temps.

- Dispositifs MLMR (STR-MLMR) d'émission-réception simultanée : Ces appareils peuvent transmettre et/ou recevoir simultanément sur plusieurs liaisons.
- Dispositifs MLMR améliorés (eMLMR) : Ces appareils MLMR peuvent reconfigurer dynamiquement leurs capacités de multiplexage spatial en prenant en charge plusieurs configurations de chaînes RF (Radio Frequency) pour se connecter à l'ensemble des chaînes RF disponibles. Cela peut être bénéfique lorsque certaines chaînes RF peuvent prendre en charge différentes bandes, par exemple une seule chaîne RF capable de prendre en charge la bande 5 ou 6 GHz[25].

II.4.7 Opération multi-liens pour RTA

L'opération multi-liens est une approche rentable pour améliorer la fiabilité et réduire la latence dans le cadre de la norme TGbe. Elle tire parti de la diversité des canaux pour obtenir de meilleurs résultats. Dans le rapport du groupe de travail RTA, deux modes de fonctionnement à plusieurs liaisons sont évalués : le mode Dupliquer et le mode Joint[6](Voir la Figure II.17)

- Dans le mode Dupliquer, l'émetteur envoie des copies de chaque trame sur plusieurs liens. Lorsque le récepteur reçoit une trame, il élimine toutes les copies ultérieures. Ce schéma renforce la robustesse de la transmission en garantissant que la trame arrive sur au moins l'un des liens.[12]
- Dans le mode Joint, l'émetteur ne crée pas de copies supplémentaires, mais distribue les trames sur les liens disponibles. Ce mode permet de réduire la latence de transmission en exploitant simultanément les différents liens pour transmettre les trames[22].

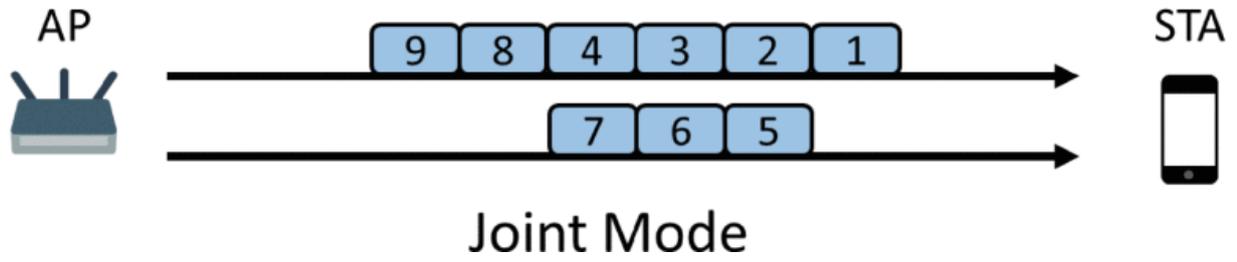
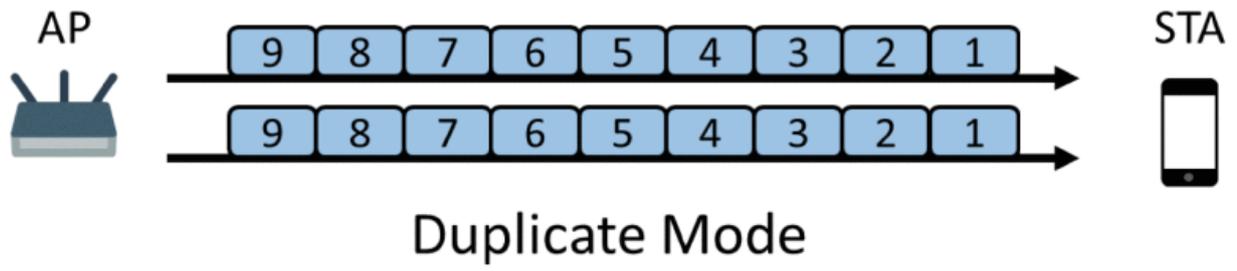


FIGURE II.17 – Mode Duplication et Mode Conjoint

II.5 Conclusion

Le Wi-Fi est désormais essentiel dans notre quotidien, simplifiant nos échanges, notre travail et nos loisirs. Au fil de ses évolutions, chaque norme, du Wi-Fi 5 au Wi-Fi 7 en cours de développement, introduit des améliorations significatives qui enrichissent notre expérience en ligne. Que ce soit le MU-MIMO du Wi-Fi 5, l'efficacité optimisée du Wi-Fi 6, ou les promesses de rapidité et de fiabilité du Wi-Fi 7, chaque progrès repousse les limites de la connectivité, nous aidant à rester connectés, productifs et divertis dans un monde toujours plus interconnecté. Le Wi-Fi 7, en particulier, apporte des innovations notables, comme l'Operation Multi-Link, qui sera examinée en profondeur dans le troisième chapitre, illustrant les travaux déjà réalisés dans ce contexte.

CHAPITRE

III

ÉTAT DE L'ART DES TRAVAUX DE RECHERCHE

III.1 Introduction

Le multilink operation est une approche intéressante permettant d'utiliser simultanément plusieurs connexions réseau afin d'améliorer les performances, la fiabilité et la redondance des communications. Dans ce chapitre, nous avons présenté plusieurs articles qui parlent du multilink operation et nous avons fait une comparaison entre ces articles pour trouver notre approche proposée.

III.2 Travaux connexes

III.2.1 Multi-Link Operation dans l'IEEE 802.11be

- **Article 1 :Study on Simultaneous Transmission and Reception on Multiple Links in IEEE 802.11be networks[17] .**

Dans l'article [17] publié en 2020, les auteurs Ilya Levitsky, Yaroslav Okatev et Evgeny Khorov ont traité de la problématique des interférences inter-liens. La Séparation Temporelle de Ressources (STR) peut provoquer une fuite d'énergie du canal de transmission vers le canal

de réception lorsque les canaux sont situés à des fréquences proches. Afin d'atténuer cet inconvénient, le Wifi 7 propose l'opération multi liens synchrone, où la transmission s'effectue sur tous les canaux dans une direction à la fois. Cette opération permet d'éliminer l'influence de la fuite d'énergie sur la réception, mais au prix d'une performance réduite et de schémas d'accès au canal complexes. L'objectif de l'article est d'examiner la faisabilité de la Séparation Temporelle de Ressources (STR) en fonction de la distance spectrale entre les canaux, de la bande passante et de la puissance d'interférence. L'article démontre comment le taux de réception des trames dépend des paramètres de transmission et d'interférence, en utilisant une plateforme d'essai basée sur des radios définies par logiciel. À partir des résultats obtenus, les auteurs déduisent la limite de distance spectrale où la STR est possible. La méthode proposée dans l'article consiste à étudier la faisabilité de la transmission full-duplex (STR) dans le contexte du multi liens Wifi, en utilisant différents canaux dans la bande de 5 GHz. Pour cela, les chercheurs ont mené des expériences visant à évaluer la qualité de réception du signal, mesurée par le taux de réception des trames, dans diverses configurations de transmission sur ces canaux. Pour mener à bien cette étude, une plateforme d'essai a été mise en place, comprenant deux radios définies par logiciel (USRPs) et un logiciel modifié du Framework d'application LabVIEW Communications 802.11. Les expériences ont été réalisées en maintenant les positions des USRPs constantes, avec une distance fixe entre eux et des antennes parallèles. Les résultats soulignent l'importance de plusieurs facteurs. Une distance spectrale plus grande entre les canaux améliore le taux de réception des trames (FRR) et la qualité de réception. Une largeur de bande plus grande des canaux peut aider à résister aux interférences. Le traitement du signal et la puissance de transmission jouent également un rôle crucial dans la réduction des interférences et l'optimisation des performances du système. Ces résultats mettent en évidence les considérations clés pour améliorer la transmission full-duplex. Les résultats soulignent que plusieurs facteurs sont importants pour la transmission full-duplex. Une distance spectrale plus grande entre les canaux améliore le taux de réception des trames et la qualité de réception. Une largeur plus grande des canaux aide à résister aux interférences. Le traitement du signal et la puissance de transmission jouent également un rôle crucial dans la réduction des interférences et l'optimisation des performances du système.

- **Article 2 :Study of Multi-Link Channel Access Without Simultaneous Transmit and Receive in IEEE 802.11be networks[14] .**

Dans l'article [14] publié en 2022, les auteurs Nikolaj Korolev, Ilya Levitsky, Ivan Startsev, Boris Bellalta et Evgeny Khorov ont traité la problématique de l'optimisation de l'utilisation des canaux disponibles pour les MLD en les faisant transmettre leurs données de manière plus efficace. L'interférence croisée entre les liens constitue un obstacle majeur dans les systèmes multi-liens. Elle limite la capacité des appareils à transmettre et recevoir des informations si-

multanément sur différents liens. Lorsqu'un appareil commence à transmettre sur un lien, il peut être perturbé par des interférences, ce qui l'empêche de recevoir ou même de détecter le signal sur ce lien. Cette problématique représente un défi significatif pour les performances des systèmes multi-liens. Les stations héritées qui ne prennent pas en charge l'opération multi-liens posent des problèmes de performances et d'équité d'accès au canal multi-liens. Ces stations peuvent entraîner des limitations et des déséquilibres lors de l'utilisation du canal multi-liens, ce qui affecte la qualité de service et l'équité entre les différents utilisateurs. L'article vise à évaluer différentes approches d'accès au canal dans le contexte de l'opération non-STR (Single-Transmit-Receive) du Wifi 7. Son but ultime est d'améliorer les performances des réseaux Wifi 7 multi-liens dans des environnements difficiles où la congestion peut être un défi. La méthode proposée dans la norme vise à permettre les multi-liens en introduisant le concept de MLD (Multi-Link Device) avec une seule interface de contrôle vers la sous-couche LLC et plusieurs interfaces radio affiliées. Chaque interface radio exécute ses propres protocoles MAC et PHY. Les MLD (Multi-Link Device) peuvent profiter de tous les schémas EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) en raison de leur capacité à accéder à plusieurs liens simultanément. Cependant, l'alignement de trame peut avoir à la fois des avantages et des inconvénients pour les MLD et les appareils hérités. L'enjeu futur est de concevoir des schémas d'accès multi-liens qui offrent des gains significatifs pour les MLD tout en maintenant l'équité et le débit total du réseau. Cela nécessite une approche équilibrée pour optimiser les performances des MLD sans compromettre les autres utilisateurs du réseau.

- **Article 3 : LFTA : Legacy Friendly Traffic Allocation Strategy for Multi-Link Operation in WiFi7[15].**

Dans l'article [15] publié en 2024, les auteurs Jagrati Kulshrestha, Nadeem Akhtar, Preyas Hathi et Mukulika Maity ont abordé la problématique de garantir la coexistence avec des appareils non-MLO/hérités en proposant une approche d'allocation de flux, appelée LFTA (Allocation de Trafic Amical à l'Héritage et Sensible à la Congestion à l'Arrivée des Flux). Cette approche vise à optimiser l'utilisation des MLO tout en assurant la coexistence avec les appareils non-MLO/hérités. Les auteurs proposent deux méthodes : Dans un scénario où seuls des STAs capables de MLO sont présents, la méthode LFTA est utilisée pour optimiser l'occupation du canal en prenant en compte à la fois l'occupation du canal et le débit du lien pour une allocation intelligente des flux. LFTA maintient une occupation équilibrée des canaux jusqu'au seuil souple, ce qui permet une distribution équilibrée de la charge.

Avec la coexistence de dispositifs hérités/non-MLO, LFTA offre des avantages significatifs dans les scénarios de déploiement clairsemé et dense. Dans un déploiement clairsemé, LFTA surpasse les autres approches en attribuant davantage de flux hérités tout en maintenant une allocation efficace des flux MLO. Il obtient également un taux de satisfaction moyen plus élevé et un indice de justice de gain supérieur. Dans un déploiement dense, LFTA continue de surpasser les approches de référence en attribuant plus de flux hérités tout en maintenant une allocation efficace des flux MLO. Bien que la surcharge des canaux puisse empêcher l'attribution de certains flux MLO, la performance globale de LFTA reste élevée.

Dans l'ensemble, LFTA se démarque par sa capacité à gérer efficacement la coexistence de dispositifs hérités et non-MLO, tout en maintenant de bonnes performances en termes d'occupation des canaux, de satisfaction moyenne et d'équité dans l'allocation des flux. Les auteurs évaluent et comparent LFTA avec d'autres schémas d'allocation de flux MLO de référence tels que SLCI, MLSA et MCAA à travers des simulations. L'objectif de cet article est de mettre en évidence les problèmes d'équité liés à l'opération multi-lien du Wifi 7 en présence d'appareils non-MLO.

Les résultats montrent que LFTA alloue davantage de flux aux appareils hérités avec un impact minimal (2 pourcent) sur les appareils MLO, tout en offrant une satisfaction moyenne plus élevée à tous les nœuds. De plus, LFTA permet une distribution de charge équilibrée entre les interfaces. LFTA alloue les flux des MLDs aux différentes interfaces tout en réservant une capacité du canal pour les appareils non-MLD. Cette approche prend en compte à la fois l'occupation du canal et le débit du lien pour effectuer une allocation intelligente. Elle utilise des seuils rigides et souples pour garantir une répartition équilibrée des ressources du canal et un équilibrage de charge entre les différents liens.

- **Article 4 :An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation[7] .**

Dans l'article [7] publié en 2022. Les auteurs Marc Carrascosa, Giovanni Geraci, Edward Knightly, et Boris Bellalta ont traité la problématique de l'amélioration de la latence des réseaux WIFI par le fonctionnement en MLO. L'objectif de cet article est d'étudier l'occupation des canaux d'une manière symétrique et asymétrique en deux modes d'accès au canal MLO : MLO-STR, où deux interfaces radio sont exploitées de manière indépendante, et MLO-NSTR, où une interface agit en tant que primaire et l'autre en tant que secondaire, qui sont en cours de considération par le groupe de travail 802.11be en plus du fonctionnement en mode SLO hérité du WIFI. Un jeu de données WACA est utilisé pour évaluer la latence du MLO 802.11be dans des environnements réels, mettant en lumière les mesures over-the-air de l'occupation de la bande des 5 GHz. Ce jeu de données, collecté lors de campagnes de mesure étendues, inclut des observations du stade de football Camp Nou du FC Barcelone, offrant une variété de conditions d'activité du spectre. Les échantillons du spectre sont constitués d'une seconde de mesures consécutives du RSSI, avec une résolution de 10 microseconde. Le jeu de données FCB-WACA est utilisé pour étudier l'impact des différentes combinaisons d'occupations des canaux primaire et secondaire sur les performances du MLO-BSS. En résultat, Les auteurs de cet article ont montré que lorsque les deux canaux sont en moyenne également occupés (une occupation statistiquement symétrique), les deux modes MLO peuvent réduire le retard en tirant parti d'une deuxième interface radio. En revanche, dans les canaux occupés de manière asymétrique, ils ont découvert d'une manière surprenante que l'utilisation de MLO-STR peut être préjudiciable et entraîner des valeurs de latence encore plus élevées que SLO (Single-Link Operation). Ils ont défini MLO-STR+ pour montrer que ce problème peut être surmonté en retardant l'attribution du paquet jusqu'à l'expiration du backoff, ce qui permet également d'obtenir une latence globalement plus faible.

- **Article 5 : Analyses of NSTR Multi-Link Operation in the Presence of Legacy Devices in an IEEE 802.11 be Network [13] .**

Dans l'article [13] publié en 2021. Les auteurs Nikolay Korolev, Ilya Levitsky et Evgeny Khovont ont traité la problématique de considérer des MLD NSTR qui fonctionnent sur deux liens et prennent en charge les deux options : lorsque la station qui termine sa procédure de recul plus tôt attend une autre station à condition que le canal de l'autre station soit inactif et lorsque la station n'attend pas. L'objectif de cet article est d'étudier les performances des schémas d'accès au canal utilisés par les MLDs NSTR en présence d'appareils hérités. Un MLD peut être considéré comme étant composé de plusieurs stations ayant une couche supérieure MAC commune et des fonctionnalités MAC inférieures et PHY séparées. Par défaut, les MLD sont censés transmettre des données de manière asynchrone sur plusieurs liens. Ainsi, de tels MLD peuvent effectuer une transmission et une réception simultanées, c'est-à-dire l'opération STR. Cette opération est réalisable si le dispositif prend en charge STR, les canaux utilisés par ces liens étant séparés de manière suffisante. En suivant les idées du cadre MLD NSTR, on

pourrait résoudre ce problème comme suit : si le MLD connaît la durée de la transmission sur un lien (par exemple, en capturant le préambule de la trame, qui contient cette information), il peut commencer la transmission sur l'autre lien d'une durée telle que les deux transmissions se terminent simultanément, cette approche, appelée "Alignement", fonctionne comme suit : Supposons que le canal sur le Lien 1 soit occupé par une transmission en cours d'une durée connue, et que le recul de la deuxième STA atteigne zéro, le MLD remporte la contention sur le Lien 2 mais ne peut pas démarrer la transmission sur les deux liens. Ainsi, le MLD commence la transmission uniquement sur le Lien 2, et la durée de cette transmission égale à la durée restante de la transmission sur le Lien 1. En supposant que les réponses sur ces transmissions ont des durées similaires, l'état du canal sera presque synchronisé, ce qui augmente la probabilité pour les MLDs de commencer une transmission synchrone dans les deux liens. Dans cet article, deux scénarios sont étudiés dans le cadre d'un réseau Wifi hétérogène. Le premier scénario, nommé Symétrique, présente une répartition égale entre les appareils hérités et multi liens, tandis que le second, appelé Asymétrique, ne comprend aucun appareil hérité. Dans ces configurations, un point d'accès (AP) fonctionne en tant que MLD STR sur deux liens distincts, tandis que les appareils clients sont répartis entre des appareils hérités et des appareils multi liens NSTR MLD. L'objectif principal est d'évaluer le débit par appareil dans différents scénarios de répartition des appareils, en analysant l'impact de différentes options d'accès au canal : Pas d'Attente, Attente, et Attente + Alignement. Les résultats numériques démontrent que les options pas d'Attente et Attente produisent des résultats similaires, indiquant que les MLDs n'attendent pas l'autre lien et transmettent dès qu'ils remportent la contention, même en présence d'un seul appareil hérité. Dans le Scénario Symétrique, le débit par appareil diminue à la fois pour les appareils hérités et multi liens lorsque le nombre de MLDs augmente, en raison d'une augmentation des collisions pour l'accès au canal. Cependant, le débit par appareil des MLDs reste significativement plus élevé que celui des STAs hérités dans ce scénario. En outre, l'option Attente + Alignement ne présente pas de gain de débit significatif pour les MLDs, mais augmente le débit des appareils hérités, surtout lorsque le nombre de stations héritées diminue. Enfin, la probabilité de remporter la contention pour l'accès au canal est faible pour les MLDs après le redémarrage du backoff en présence d'au moins une STA héritée sur le lien, ce qui avantage les appareils hérités dans ces conditions.

- **Article 6 : Performance and Coexistence Evaluation of IEEE 802.11be Multi-link Operation**[8]

.

Dans l'article [8] publié en 2023, les auteurs Carrascosa-Zamacois, Marc, Galati-Giordano, Lorenzo, Jonsson, Anders, et Geraci, Giovanni, ainsi que Bellalta, Boris, ont traité la problématique d'explorer les performances des implémentations MLO spécifiques, l'interaction entre plu-

sieurs dispositifs implémentant MLO, et la coexistence de MLO avec l'accès aux canaux hérités. L'objectif de cet article est de faire une étude approfondie comparant les opérations à liaison unique (Single-Link, SL), la radio unique à liaisons multiples (Multi-Link Single Radio, MLSR) et le multi-lien multi-radio (Multi-Link Multi-Radio, MLMR).

Dans cet article, les auteurs ont proposé 3 méthodes. La première méthode est les opérations traditionnelles à liaison unique (Single-Link, SL) : l'accès au canal se fait par défaut en suivant les instructions de la Fonction de coordination distribuée (DCF) et en fonctionnant sur une seule interface radio. Du côté de l'émetteur, lorsqu'un paquet est disponible dans le tampon de transmission, une instance de backoff est lancée et le paquet est transmis une fois que le délai d'expiration est atteint.

La deuxième méthode est la radio unique à liaisons multiples (Multi-Link Single Radio, MLSR) : plusieurs interfaces radio sont disponibles, mais une seule est utilisée de façon opportuniste. Du côté de l'émetteur, une fois qu'un paquet est disponible dans le tampon, une instance de backoff indépendante est lancée sur chaque interface sans fil, avec les paquets de données ensuite affectés à une seule de ces interfaces selon une stratégie spécifique, par exemple, à celle dont le backoff expire en premier. Aucune autre transmission n'est amorcée avant que la transmission en cours sur l'interface sélectionnée ne soit terminée. Une fois que l'émetteur a déterminé l'interface à utiliser pour la transmission en cours, il en informe le récepteur, qui active alors complètement sa radio 802.11be pour recevoir le paquet de données et renvoyer l'accusé de réception (ACK) correspondant.

La troisième méthode est le multi-lien multi-radio (Multi-Link Multi-Radio, MLMR) : toutes les interfaces radio multiples sont conformes à la norme 802.11be et sont capables de fonctionner simultanément, effectuant ainsi plusieurs transmissions simultanément. Du côté de l'émetteur, une fois qu'un paquet est disponible dans le tampon de transmission, une instance de backoff est lancée sur toutes les interfaces sans fil inactives, en allouant les paquets de données progressivement vers les interfaces à mesure que leurs backoffs expirent. Du côté du récepteur, les paquets sont alors reçus sur tous les liens utilisés par l'émetteur.

À travers cette étude approfondie comparant les opérations à liaison unique (SL), la radio unique à liaisons multiples (MLSR) et le multi-lien multi-radio (MLMR), les auteurs ont identifié les points suivants : Dans un environnement de BSS isolé sans conflit de canaux, MLMR avec deux interfaces peut réduire les pires retards jusqu'à cinq fois, tandis qu'une troisième interface apporte des gains supplémentaires négligeables. Deux BSS MLSR en concurrence affichent des délais similaires à ceux d'un SL dans un environnement sans conflit. Paradoxalement, malgré leur complexité accrue, les BSS MLMR peuvent parfois subir des retards plus élevés en bloquant l'accès rapide au canal pour un autre. En présence d'anciens BSS SL, un BSS MLMR augmente son propre débit aux dépens des BSS SL voisins, mais permet également de

réduire les retards pour les charges de trafic faibles à moyennes.

- **Article 7 : Analysis of Latency and Reliability Improvement with Multi-Link Operation over 802.11[16]** .

Dans l'article [16] publié en. Les auteurs Guillermo Lacalle, naki Val, Oscar Seijo, Mikel Mendicute, Dave Cavalcanti et Javier Perez-Ramirez ont traité la problématique du fonctionnement des réseaux TSN sans fil industriels avec la technique MLO. L'objectif de cet article est d'évaluer l'amélioration de la fiabilité et de la latence des techniques multi-liens proposés dans le 802.11be. Pour faire cette étude, Les auteurs ont proposés Un Scenarios (de Latence) sur deux réseaux : Réseau hérité composé d'un Point d'Accès (AP), d'une Station (STA) 802.11be en mesure, et de STAs héritées. Ces dernières transmettent des informations de manière indépendante, pouvant entraîner des interférences. Les simulations ont été réalisées avec différentes configurations pour analyser l'effet de Multi-Link (MLO) sur différents niveaux d'interférence. Le second réseau est le réseau industriel qui représente un environnement industriel avec une gestion planifiée des appareils connectés. Trois types de configurations ont été proposés, chacun avec une STA en mesure, un ou plusieurs AP, des STAs Multiutilisateurs, et des STAs non connectées interférant dans le réseau. Les canaux utilisés pour les simulations s'appuient sur des mesures de radiofréquence (RF) dans des environnements industriels sélectionnés, notamment une usine d'assemblage automobile, une centrale thermique, un atelier de machines, et un site d'essai en plein air. Des profils de délai d'alimentation (PDP) pour les bandes de fréquences 2,4 GHz et 5 GHz ont été obtenus à partir de ces mesures. Des modèles de canal Rayleigh et Rician ont également été utilisés pour évaluer et comparer les résultats. Les résultats montrent la fiabilité de la communication pour différents niveaux de corrélation entre les canaux. L'utilisation de canaux non corrélés améliore la transmission, réduisant le SNR moyen requis pour atteindre un PER ciblé. Dans un environnement industriel, la bande des 5 GHz offre de meilleurs résultats que la bande des 2,4 GHz pour la même valeur de SNR moyen. Pour le scénario hérité, l'utilisation de MLO améliore la latence, permettant à environ 40 pourcent des transmissions d'atteindre leur destination dans la plage sub-milliseconde avec deux liens parallèles. Dans le scénario industriel, la latence varie selon les configurations, mais l'introduction de liens parallèles améliore considérablement les résultats, en particulier dans des scénarios difficiles où de nombreuses retransmissions sont nécessaires.

- **Article 8 : Study of Band Allocation Policies in IEEE 802.11be Networks with Devices of Different Capabilities[21]** .

Dans l'article [21] publié en 2023. Les auteurs Daniele Medda, Athanasios Iossifides et Periklis Chatzimisios, ont traité la problématique de pouvoir transmettre simultanément sur plusieurs bandes de fréquences pour atteindre des débits massifs (pouvant atteindre 40 Gbit/s) et une latence plus faible par les MLD par la technique MLO de l'amendement 802.11be. Cependant,

la coexistence des MLD avec les appareils hérités dans les déploiements de réseaux locaux sans fil (WLAN). L'objectif de cet article est d'étudier des différentes politiques de gestion de bandes sur un WLAN densément peuplé à trois bandes, permettant aux MLD d'utiliser une ou plusieurs bandes pour la procédure d'accès et le transfert de données. Aussi évalue via des simulations approfondies, le retard d'accès des appareils et le débit du réseau par rapport au ratio d'appareils hérités et de MLD. De même cet article permet de montrer qu'en utilisant différentes politiques d'allocation de bandes pour les MLD, plusieurs compromis concernant le débit et le retard d'accès se posent et nécessitent une considération prudente pour éviter une dégradation des performances. Pour cette étude les auteurs proposent une étude d'un modèle de système basé sur un réseau local sans fil (WLAN) dans un environnement dense avec une densité de 30 à 50 appareils sur une zone de 15×15 m². Ils considèrent un point d'accès conforme à la norme IEEE 802.11be et des stations utilisant le mécanisme de réservation request-to-send/clear-to-send (RTS/CTS) pour réduire les collisions. Les appareils peuvent être des dispositifs hérités (legacy devices) conformes à la norme IEEE 802.11ac, ou des appareils multi-liens (MLD) avec trois interfaces activées pouvant fonctionner dans différentes bandes (2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz). Les MLD utilisent une méthodologie d'accès multi-liens avec priorité de contre-backoff la plus courte (MLA-S). Quatre politiques d'allocation de bandes différentes sont étudiées, basées sur la façon dont les MLD utilisent les bandes pour l'accès au canal et la transmission de données. Les politiques varient de l'utilisation exclusive de la bande 5 GHz par les MLD à l'utilisation de toutes les bandes (2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz). Les performances du système sont évaluées en termes de délai d'accès et de débit agrégé du réseau. Les résultats de l'étude indiquent que la meilleure performance en termes de débit agrégé du réseau est obtenue lorsque les MLD utilisent simultanément les trois bandes disponibles pour la transmission de données, soit dans les cas Aall/Dall et A5,6 /Dall, ces cas permettent aux MLD de tirer parti de toutes leurs capacités, ce qui augmente le débit global du réseau. En revanche, la pire performance en termes de débit est observée lorsque les MLD partagent la bande 5 GHz avec les appareils hérités pour l'accès au canal et transmettent des données sur seulement deux bandes, comme dans le cas A5/D 5,6. En ce qui concerne le délai d'accès, les résultats montrent que le choix des politiques d'allocation de bandes a un impact significatif, lorsque les MLD n'utilisent pas la bande 2,4 GHz, le délai d'accès pour les appareils hérités dans cette bande est le plus faible, mais cela entraîne une réduction significative du débit global. En revanche, lorsque les MLD utilisent la bande 2,4 GHz, le délai d'accès pour les appareils hérités dans cette bande augmente, mais le débit global reste satisfaisant. La meilleure performance en termes de délai d'accès pour les MLD est également observée lorsque toutes les bandes sont utilisées pour l'accès au canal et la transmission de données.

- **Article 9 :Performance of 802.11be Wi-Fi 7 with Multi-Link Operation on AR Applications**[1]

Dans l'article [1] publié en 2023. Les auteurs Molham Alsakati, Charlie Pettersson, Sebastian Max, Vishnu Narayanan Moothedath, James Gross, ont traité la problématique qui concerne l'amélioration des performances du Wi-Fi pour prendre en charge les applications de réalité augmentée (AR). Les applications de réalité augmentée (AR) nécessitent une grande capacité de débit, une faible latence et une grande fiabilité pour offrir une expérience utilisateur de haute qualité. L'amendement 802.11be, connu sous le nom de Wi-Fi 7, vise à améliorer les capacités du Wi-Fi pour répondre aux exigences de ces applications. Une fonctionnalité clé introduite dans cet amendement est l'opération à liens multiples (Multi-Link Operation ou MLO). L'objectif de cet article est d'évaluer les performances de MLO, en utilisant différentes politiques, dans la prise en charge des applications AR par rapport à l'utilisation d'un seul lien (Single-Link ou SL). Des simulations expérimentales ont été réalisées à l'aide d'un simulateur Wi-Fi basé sur des événements. Dans cet article, les chercheurs ont utilisé un simulateur de système Wi-Fi basé sur des événements pour mener des simulations expérimentales. Leur méthode consistait à établir un scénario à cellule unique avec un point d'accès (AP) au centre et plusieurs stations (STAs) positionnées de manière aléatoire à une distance maximale de 10 m de l'AP. Les STAs étaient activées dès le début de la simulation et restaient actives pendant 50 secondes. Les simulations ont été effectuées avec différentes graines aléatoires pour garantir la validité statistique des résultats. Cette approche a permis aux chercheurs d'évaluer les performances du système en fonction de ces paramètres et de fournir des résultats significatifs pour leur étude. Les résultats de l'article indiquent que différentes politiques de liaison et configurations de liens ont été évaluées en termes de performances de délai pour les flux de données en réalité augmentée (AR). Les simulations montrent que la politique Greedy avec une configuration de liaison de 2x40 MHz offre les valeurs de délai les plus faibles, tandis que les politiques Uniform, Congestion et Condition ont des valeurs de délai plus élevées que l'utilisation d'un seul lien (SL). Le flux vidéo descendant (DL) a des valeurs de délai plus élevées que les flux montants (UL), ce qui limite le nombre maximum de stations (STAs) pouvant être pris en charge. En général, les résultats mettent en évidence l'importance de choisir judicieusement les politiques de liaison et les configurations de liens pour optimiser les performances du système dans les applications de réalité augmentée.

- **Article 10 : Opération Multi-Lien avec Accès au Canal Synchrone Amélioré dans les Réseaux LAN sans Fil IEEE 802.11be : Problèmes de Coexistence et Solutions[23] .**

L'article[23] publié en 2021. Les auteurs Murti and Ji-Hoon Yun ont traité le défi de la coexistence dans les déploiements denses de Wi-Fi 7, notamment avec l'introduction de l'opération

multi-lien. Cet article propose et évalue plusieurs solutions pour atténuer ce problème. L'objectif principal est de proposer un schéma d'accès multi-lien aux canaux, d'identifier les problèmes de coexistence entre les appareils hérités et les appareils multi-lien (MLD), et de proposer des solutions adaptées. Les auteurs étudient également la capacité d'envoi et de réception simultanée ou non simultanée, ainsi que des schémas d'accès synchrones et asynchrones. Quatre fonctionnalités sont présentées pour résoudre le problème de "Free riding", où les stations MLD obtiennent toujours la priorité de transmission. Ces fonctionnalités incluent le repiquage d'un compteur de rebours, le doublement de la taille de la fenêtre de contention, le passage à un autre ensemble de fenêtres de contention, et la compensation du compteur de rebours. Parmi ces solutions, la méthode de compensation du compte à rebours offre les meilleures performances en termes de coexistence, avec une diminution marginale du débit des appareils multi-lien. Les auteurs ont également proposé des métriques pour évaluer le débit et la latence, démontrant ainsi l'efficacité des solutions proposées.

III.2.2 Tableau Comparatif

Article Technique	FULL-Duplex (STR)	NSTR	Simulation et analyse de performance d'un réseau	Étude de co-existence MLO/Legacy	Evaluation Débit/Latence
[17]	✓		✓		
[14]		✓		✓	✓
[15]			✓	✓	
[7]	✓	✓	✓		✓
[13]		✓	✓	✓	
[8]			✓	✓	✓
[16]			✓		✓
[21]			✓	✓	✓
[1]			✓		✓
[23]	✓	✓	✓	✓	✓

TABLE III.1: Tableau comparatif

III.3 Conclusion

Le multilink operation se présente comme une approche prometteuse pour améliorer les performances, la fiabilité et la redondance des communications réseau. L'étude des travaux existants a permis d'identifier les principaux avantages et défis de cette approche. Dans l'article que nous avons choisi, les auteurs proposent des solutions concrètes pour résoudre les problèmes de coexistence entre appareils legacy et multi-lien dans les réseaux Wi-Fi 7, comme un schéma d'accès multi-lien aux canaux et des mécanismes innovants. Dans le prochain chapitre, nous allons expliquer notre propre approche visant à optimiser davantage les bénéfices du multilink operation.

CHAPITRE

IV

SIMULATION ET RÉSULTATS

IV.1 Introduction

La simulation permet de tester à moindre coût de nouveaux protocoles et d'anticiper les problèmes futurs afin de choisir la meilleure solution technologique. MATLAB est un outil de calcul numérique très complet, qui offre de nombreuses fonctionnalités comme la manipulation de matrices, l'affichage de données et l'intégration avec d'autres langages. Dans ce chapitre, l'objectif est de simuler l'algorithme proposé et d'analyser les résultats obtenus en faisant varier différents paramètres.

IV.2 Pourquoi Matlab ?

MATLAB est un environnement de calcul scientifique très complet et convivial, offrant aux ingénieurs, chercheurs et scientifiques un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. Grâce à son approche matricielle et à ses fonctions graphiques performantes, MATLAB permet de traiter des données sans limite de taille, d'effectuer des calculs rapidement et de modifier aisément les paramètres des graphiques. Compatible avec Windows et Linux, son apprentissage est intuitif et facilité par l'aide en ligne, permettant des gains importants en termes de productivité et de créativité (Voir la Figure [IV.1](#)).

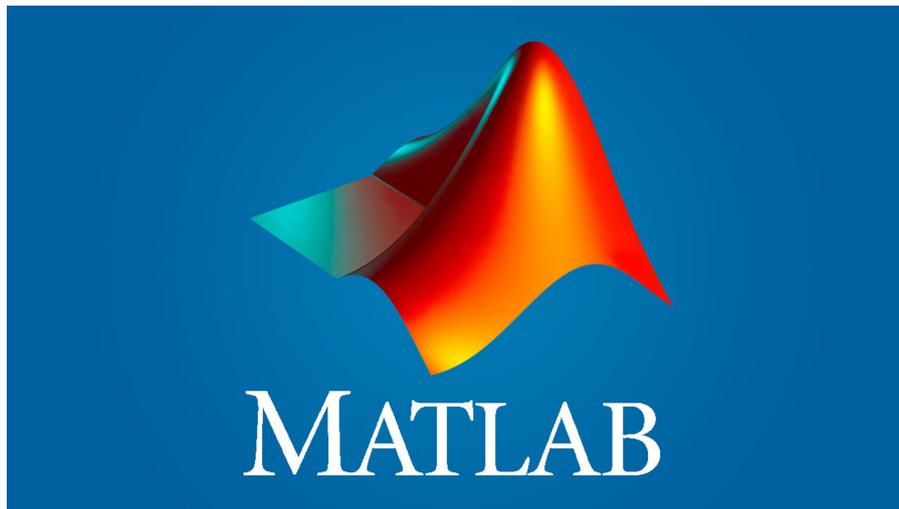


FIGURE IV.1 – Logo MATLAB

IV.3 Proposition

IV.3.1 Description de la méthode

- **Station MLD :**

Les stations MLD (Multi-Link Device) dans la norme IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) sont des stations qui utilisent le Multi-Link Operation (MLO).

- **Station héritée :**

Également connues sous le nom de legacy, réalisent des transmissions et réceptions via un seul lien (Single Link). Elles opèrent selon des normes antérieures.

- **Sync-FT**

Sync-FT est un système hybride qui combine les transmissions synchrone et asynchrone pour une transmission rapide (Fast Transmission), permettant à la fois les capacités STR et non STR simultanément. En mode asynchrone, les liens MLD peuvent exécuter le backoff (bo) individuellement, tandis que le mode synchrone permet de geler les compteurs de backoff. Une fois les transmissions terminées, les liens reprennent un nouveau cycle de backoff. Ceux qui ont achevé leur cycle de backoff au moment de la transmission en commencent un nouveau, tandis que ceux dont le cycle a été gelé au début de la transmission reprennent leur cycle gelé. Cette méthode réduit le risque d'échec d'utilisation de NSTR en MLD dû aux interférences de puissance RF.

IV.3.2 Problème de Free-Reding

Le "free-riding" fait référence à une liaison qui peut transmettre des données avant que son processus de backoff ne soit terminé. Ce comportement accorde la priorité d'accès au canal au MLD, lui permettant d'obtenir plus de temps de transmission aux appareils hérités qui subissent alors de longs et fréquents temps d'attente. Le "free-riding" donne donc un avantage injuste à certaines liaisons par rapport aux autres (Voir la Figure IV.2).

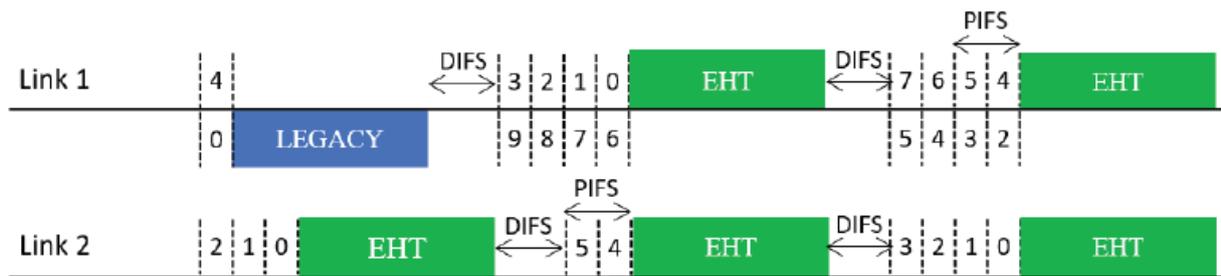


FIGURE IV.2 – Problème concernant la coexistence des MLDs EHT avec les périphériques hérités

IV.3.3 Solution proposée

La solution proposée consiste à pénaliser les liaisons effectuant du "free-riding" lors de leurs accès ultérieurs au canal. L'objectif de cette solution est que chaque liaison d'un MLD subisse un temps de backoff similaire à celui d'un périphérique hérité sur le même canal, afin de rétablir une équité d'accès. Nous avons utilisé la méthode "doublement de CW avec compensation" (Double CW with Compensation) en la comparant avec une méthode déjà existante "Repick d'un compteur de backoff".

IV.3.4 Repick d'un compteur de backoff

Cette fonctionnalité permet à une liaison "free-riding" de repicker un nouveau compteur de backoff et de redémarrer un BO basé sur ce nouveau compte immédiatement après une transmission en "free-ride" (Voir la Figure IV.2), appelé aussi Repick. Dans la Figure illustré, la liaison "free-riding" (Liaison 2) avec Repick démarre un nouveau BO avec un compteur de backoff de neuf. Sans cette fonctionnalité, la liaison utiliserait le compte précédent de trois. La valeur du nouveau compte repiqué n'est pas affectée par le fait que la transmission "free-riding" ait réussi ou non. Elle suit la valeur de CW actuelle de la liaison

(Voir la Figure IV.3) .

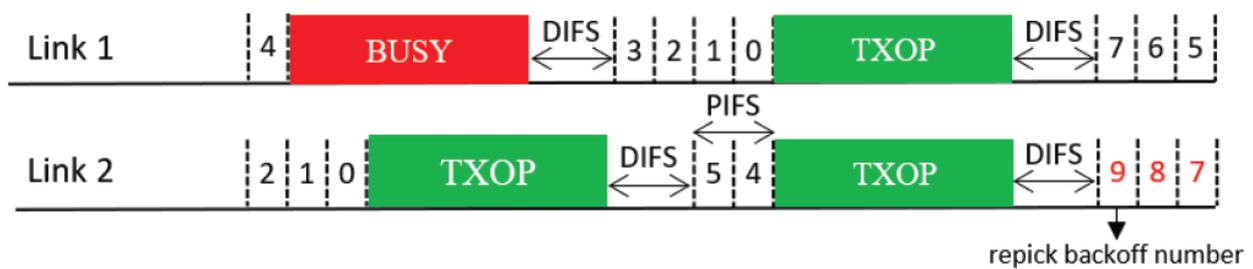


FIGURE IV.3 – Repicker un compteur de backoff (Repick)

IV.3.5 Doublement de CW avec compensation

La fonctionnalité utilise le doublement du CW et la compensation du temps de rebours comme pénalité. Dans cette méthode, après y avoir une situation de "Free-riding", la fenêtre de contention est doublée et la valeur du BO actuelle avant la transmission en Free-Riding est enregistrée, le bo gelé est poursuivi par la STA après avoir terminé sa transmission "Free-ride". Pour une nouvelle transmission, la STA MLD tire une valeur de bo de la nouvelle CW doublé et ajouté à la valeur du BO gelé. Par conséquent, le prochain compteur de backoff à choisir pour cette liaison aura une valeur plus élevée en moyenne (Voir la Figure IV.2).

• **Explication du Schéma :**

Lorsque la station MLD termine son BO, le MLD effectue une PIFS sur le lien 2 et commence à transmettre sur l'ensemble des liens détectés (lien 1 et lien 2), dans ce cas le lien 2 subit une situation de Free-Riding, la fenêtre de contention CW est doublée sur le lien 2 et la valeur du BO est enregistrée (qui est 4) comme pénalité pour le lien 2 d'avoir effectué une transmission en Free-Ride. Une fois que les liens ont terminé la transmission, le lien 2 reprend son BO (à partir de 3) et transmet lorsque son BO atteint 0. Pour une prochaine transmission le BO sur le lien 2 est tiré à partir de la nouvelle CW doublée + la valeur du BO déjà enregistré par avant (lors de la transmission en Free-Ride) dans cette exemple on a tiré un BO égale à 20 (Voir la Figure IV.4).

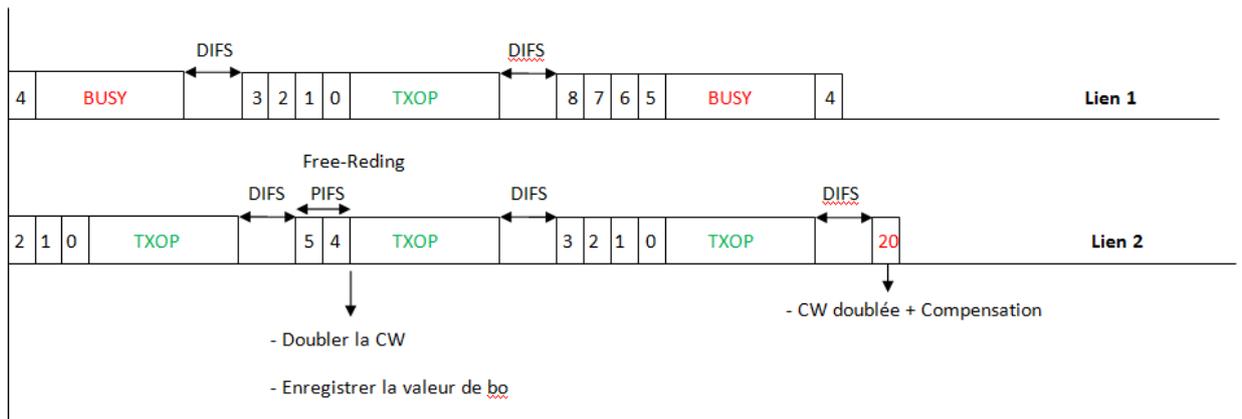


FIGURE IV.4 – Schéma de l'approche

IV.3.6 Pseudo Algorithme

Algorithme : Procédure proposée d'accès au canal multi-lien pour une STA.

- 1 : tant que la STA a un paquet à transmettre faire
- 2 : $b_j \leftarrow \text{Rand}[0, CW - 1]$ # Choisir une nouvelle valeur de compteur de backoff
- 3 : tant que $b \neq 0$ faire
- 4 : si une autre STA héritée a terminé un processus de backoff et est sur le point de transmettre un paquet alors
- 5 : Transmettre le paquet sur le lien disponible
- 6 : Fin si
- 7 : si une autre STA MLD a presque terminé son processus de backoff alors
- 8 : Transmettre le paquet sur le canal donné
- 9 : Fin si
- 10 : si le canal est inactif pendant PIFS alors
- 11 : Transmettre le paquet sur le lien disponible # Transmission en Free-Ride
- 12 : $CW_j \leftarrow \min(2(CW + 1) - 1, CW_{\max})$
- 13 : tant que $b \neq 0$ faire
- 14 : $b = b - 1$
- 15 : Fin tant que
- 16 : Transmettre le paquet
- 17 : $b_j \leftarrow b + \text{bold}$ # Ajouter la valeur restante du compteur de backoff à la valeur actuelle
- 18 : fin si
- 19 : tant que le canal est détecté occupé faire
- 20 : Surveiller le canal pendant DIFS
- 21 : fin tant que
- 22 : $b_j \leftarrow b - 1$ pour chaque durée de Tslot inactif
- 23 : fin tant que
- 24 : Transmettre le paquet sur le canal donné
- 25 : si la transmission réussit alors
- 26 : $CW_j \leftarrow CW_{\min}$
- 27 : sinon
- 28 : $CW_j \leftarrow \min(2(CW + 1) - 1, CW_{\max})$
- 29 : fin si
- 30 : fin tant que

IV.4 Simulation

IV.4.1 Paramètres de Simulation

Paramètres	Valeurs
CWmin	15
CWmax	1024
CW	$\max(\text{CWmin}, 1)$
PIFS	25 ms
DIFS	34
SIFS	16
Tslot	9 ms
max_transmissions	100
num_MLD_stations	100
num_inherited_stations	100
packet_size_bits	1500 * 8 bits

TABLE IV.1: Paramètres de Simulation

IV.4.2 Discussions et Résultats

- **Objectif principal de la simulation**

Notre but central avec cette simulation de la méthode de doublement de la fenêtre de contention combinée à une compensation est d'améliorer le débit de transmission, de réduire le temps moyen de transmission pour les stations héritées, et de déterminer le nombre de stations héritées qui parviennent à transmettre lorsqu'elles coexistent avec les stations MLD pour résoudre le problème de Free-Riding (voir la section 3.2). Cette méthode sera comparée à la méthode Re-pick.

- **Résultats sur le débit des stations héritées**

La simulation de la méthode Doublement de la CW + compensation montre que le débit des stations héritées est supérieur à celui obtenu pour ces mêmes stations dans la simulation utilisant la méthode Repick(voir la Figure ??).

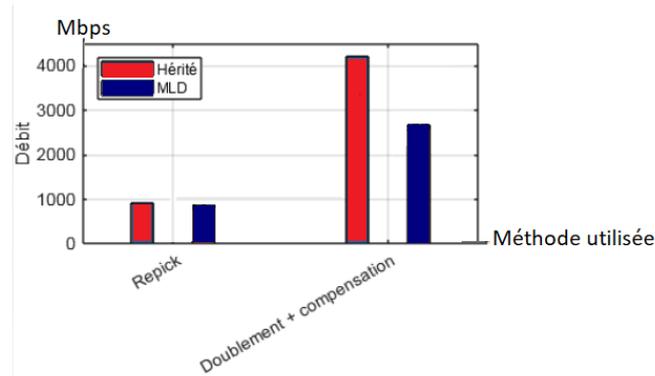


FIGURE IV.5 – Le débit des stations MLD et les stations héritées en fonction de la méthode utilisée

- **Résultats sur le temps moyen de transmission**

Le temps moyen de transmission pour les stations héritées est inférieur avec la méthode de doublement de la CW + compensation comparée au temps moyen de transmission des stations héritées utilisant la méthode Repick(voir la Figure ??).

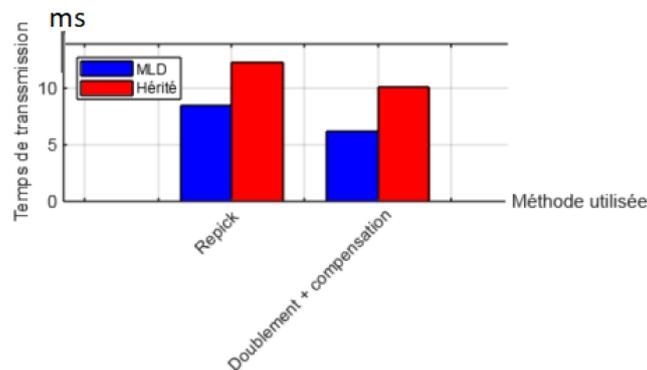


FIGURE IV.6 – Le temps de transmission des stations MLD et les stations héritées en fonction de la méthode utilisée

- **Comparaison du nombre de stations héritées transmettant**

Le nombre de stations héritées transmettant est plus élevé avec la méthode de doublement de la fenêtre de contention qu'avec la méthode Repick, dépassant également le nombre de stations MLD qui réussissent à transmettre (voir la Figure ??).

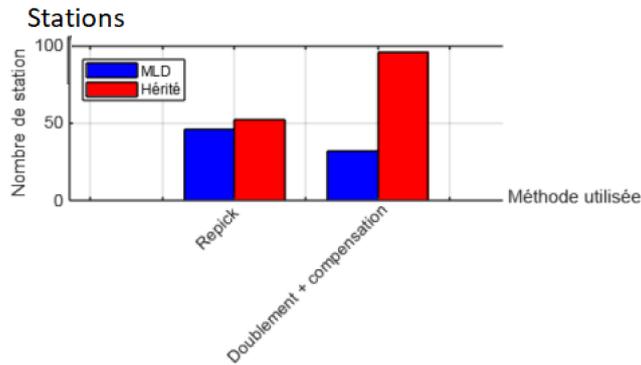


FIGURE IV.7 – Le nombre des stations MLD et les stations héritées en fonction de la méthode utilisé

IV.5 Conclusion

Ce chapitre a exploré l'application d'un logiciel de simulation (MATLAB) pour évaluer les performances d'un algorithme de gestion d'accès au canal multi-lien destiné à une STA. L'objectif était de résoudre le défi de la coexistence entre les MLD et les appareils hérités, en vérifiant l'efficacité de l'algorithme proposé.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce mémoire a exploré en profondeur la nouvelle norme 802.11be, avec un accent particulier sur la fonctionnalité Multi-Link Operation (MLO). Nous avons principalement effectué une synthèse des recherches antérieures et actuelles visant à résoudre les problèmes de coexistence entre les appareils compatibles MLO (MLD) et ceux des anciennes normes. À travers des simulations détaillées, nous avons analysé les gains de débit potentiels offerts par le MLO, ainsi que les solutions proposées pour les systèmes hérités, en pénalisant les appareils MLD qui accèdent en priorité au canal au détriment des stations héritées.

Notre objectif dans cette simulation était d'améliorer le débit en comparant la méthode Repick avec notre approche de doublement de la fenêtre de contention et de compensation. Les résultats ont indiqué que notre méthode de doublement + compensation offre des performances supérieures en termes de débit et de temps d'exécution moyen pour les stations héritées par rapport à la méthode Repick. De plus, un plus grand nombre de stations héritées ont réussi à transmettre en utilisant notre méthode.

L'évaluation de nos résultats montre que notre solution apporte des améliorations notables en termes de débits et de temps d'exécution, confirmant nos hypothèses initiales. Cependant, des défis subsistent concernant la complexité de mise en œuvre et l'impact sur la qualité de service pour les appareils hérités. Pour y remédier, nous avons développé des mécanismes permettant une coexistence équitable entre stations legacy et MLD, résolvant ainsi les problèmes de free-riding. De plus, nos optimisations ont permis d'augmenter significativement les débits tout en diminuant les temps d'exécution, améliorant l'expérience utilisateur sans compromettre la qualité de service, même pour les appareils legacy. Bien que les études existantes soient globalement cohérentes, certaines révèlent des résultats plus diversifiés selon les contextes.

En conclusion, ce mémoire souligne le potentiel positif des nouvelles fonctionnalités de la norme 802.11be sur la performance des réseaux sans fil, tout en reconnaissant certains défis à relever. En abordant les limites et en proposant des perspectives de recherche, ce travail ouvre la voie à de nouvelles explorations pour intégrer les innovations technologiques dans les réseaux sans fil.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Molham Alsakati, Charlie Pettersson, Sebastian Max, Vishnu Narayanan Moothedath, and James Gross. Performance of 802.11be Wi-Fi 7 with Multi-Link Operation on AR Applications. In *2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6, March 2023.
- [2] Alfred Asterjadhi and E Au. Compendium of motions related to the contents of the tgbe specification framework document. *Jan*, 16 :19, 2021.
- [3] Philippe ATELIN. *WiFi Réseaux sans fil 802.11 : Technologie - Déploiement - Sécurisation*.
- [4] Veronika Bauer. An overview of the 802.11ax standard. 2023.
- [5] Oscar Bejarano, Edward Knightly, and Minyoung Park. Ieee 802.11ac : from channelization to multi-user mimo. *IEEE Communications Magazine*, 51(10) :84–90, October 2013.
- [6] Huanhuan Cai, Bo Li, Mao Yang, and Zhongjiang Yan. Coordinated tdma mac scheme design and performance evaluation for the next generation wlan : Ieee 802.11be. In Yi-Bing Lin and Der-Jiunn Deng, editors, *Smart Grid and Internet of Things*, pages 297–306, Cham, 2021. Springer International Publishing.
- [7] Marc Carrascosa, Giovanni Geraci, Edward Knightly, and Boris Bellalta. An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation. In *ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications*, pages 2507–2512, May 2022.
- [8] Marc Carrascosa-Zamacois, Lorenzo Galati-Giordano, Anders Jonsson, Giovanni Geraci, and Boris Bellalta. Performance and Coexistence Evaluation of IEEE 802.11be Multi-link Operation. In *2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6, March 2023.
- [9] Aurélien GéronPréface de Marc Taieb. *WiFi ProfessionnellLa norme 802.11,le déploiement, la sécurité*.

- [10] Dominique Dhoutaut. Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc : de la simulation à l'expérimentation. 2003.
- [11] Imad Jamil. Improving spatial reuse in future dense high efficiency Wireless Local Area Networks. In *Networking and Internet Architecture*, 2015.
- [12] Evgeny Khorov, Ilya Levitsky, and Ian F. Akyildiz. Current status and directions of IEEE 802.11be, the future Wi-Fi 7. *IEEE Access*, 8 :88664–88688, 2020.
- [13] Nikolay Korolev, Ilya Levitsky, and Evgeny Khorov. Analyses of NSTR Multi-Link Operation in the Presence of Legacy Devices in an IEEE 802.11be Network. In *2021 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pages 94–98, Dec 2021.
- [14] Nikolay Korolev, Ilya Levitsky, Ivan Startsev, Boris Bellalta, and Evgeny Khorov. Study of Multi-Link Channel Access Without Simultaneous Transmit and Receive in IEEE 802.11be Networks. *IEEE Access*, 10 :126339–126351, 2022.
- [15] Jagrati Kulshrestha, Nadeem Akhtar, Preyas Hathi, and Mukulika Maity. LFTA : Legacy Friendly Traffic Allocation Strategy for Multi-Link Operation in Wi-Fi 7. In *2024 16th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, pages 448–456, Jan 2024.
- [16] Guillermo Lacalle, Iñaki Val, Oscar Seijo, Mikel Mendicute, Dave Cavalcanti, and Javier Perez-Ramirez. Analysis of Latency and Reliability Improvement with Multi-Link Operation over 802.11. In *2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pages 1–7, July 2021.
- [17] Ilya Levitsky, Yaroslav Okatev, and Evgeny Khorov. Study on Simultaneous Transmission and Reception on Multiple Links in IEEE 802.11be networks. pages 1–4, Nov 2020.
- [18] Z. H. U. Linjie, G. U. Liang, and C. H. E. N. Rongliang. A retransmission scheme in IEEE 802.11be synchronized multi-link WLANs. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E106.A(5) :871–875, 2023.
- [19] Wen Liu, An-Hung Hsiao, Li-Hsiang Shen, and Kai-Ten Feng. A new paradigm for device-free indoor localization : Deep learning with error vector spectrum in Wi-Fi systems. In *2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–6, Sep. 2023.
- [20] Álvaro López-Raventós and Boris Bellalta. IEEE 802.11be multi-link operation : When the best could be to use only a single interface. In *2021 19th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet)*, pages 1–7, June 2021.
- [21] Daniele Medda, Athanasios Iossifides, and Periklis Chatzimisios. Study of Band Allocation Policies in IEEE 802.11be Networks with Devices of Different Capabilities. In *ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications*, pages 3205–3209, May 2023.

- [22] Daniele Medda, Athanasios Iossifides, Periklis Chatzimisios, Fernando José Velez, and Jean-Frédéric Wagen. Investigating inclusiveness and backward compatibility of ieee 802.11be multi-link operation. In *2022 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pages 20–24, Nov 2022.
- [23] Wisnu Murti and Ji-Hoon Yun. Multi-link operation with enhanced synchronous channel access in ieee 802.11be wireless lans : Coexistence issue and solutions, November 2021.
- [24] Hanae Otani, Kotaro Nagano, Hirantha Abeysekera, Akira Kishida, Yusuke Asai, and Yasushi Takatori. Experimental evaluation of transmission link selection in ieee 802.11be multi-link operation :. *IEICE Communications Express*, 12(9) :528–532, 2023.
- [25] Ehud Reshef and Carlos Cordeiro. Future directions for wi-fi 8 and beyond. *IEEE Communications Magazine*, 60(10) :50–55, October 2022.
- [26] Md Hyat Ullah Shimo. Wireless Internet Connectivity 5G and Wi-Fi 6. volume 45, page 102127. Elsevier BV, June 2022.
- [27] Lingwei Xu, Tong Jin, Jianlan Guo, Liangyu Lin, Yulei Wang, and Yungui Chen. Performance analysis of synchronous multilink mac protocol with automatic repeat request. *Mobile Information Systems*, 2022 :4049008, 2022.
- [28] Mao Yang, Bo Li, Zhongjiang Yan, and Yuan Yan. Ap coordination and full-duplex enabled multi-band operation for the next generation wlan : Ieee 802.11be (eht). In *2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pages 1–7, Oct 2019.
- [29] Mohand Yazid, Adlen Ksentini, Louiza Bouallouche-Medjkoune, and Djamil Aissani. Enhancement of the txop sharing designed for dl-mu-mimo ieee 802.11ac wlans. In *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, March 2015.

RÉSUMÉ

B IEN que la norme Wi-Fi 6 (802.11ax) soit au cœur des préoccupations actuelles, les groupes de travail de l'IEEE 802.11 développent déjà la prochaine génération, 802.11be, qui semble être une évolution de la norme 802.11ax avec une augmentation de la bande passante et du nombre de flux spatiaux permettant d'atteindre des débits allant jusqu'à 40 Gbps. Cependant, 802.11be introduit le concept de "multilink operation" qui soulève des défis de coexistence entre les stations équipées de la nouvelle technologie et les appareils plus anciens. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de recherche présenté, proposant une solution innovante pour résoudre ces problèmes de coexistence. L'approche consiste à pénaliser les stations MLD qui effectuent du "free-riding" afin de rétablir une équité d'accès et d'obtenir de meilleurs débits pour les stations legacy, à l'aide d'une méthode de "doublement de la fenêtre de contention avec compensation". Enfin, le logiciel MATLAB a été choisi pour simuler et évaluer l'algorithme proposé, offrant une grande facilité d'utilisation et la capacité de transcrire un problème mathématique en un langage informatique proche du langage naturel scientifique.

Mots clés : 802.11be , Synch-FT , Free-Riding, Repick , Doublement de CW et compensation.

ABSTRACT

A LTHOUGH the Wi-Fi 6 (802.11ax) standard is at the heart of current concerns, the IEEE 802.11 working groups are already in the process of developing the next generation of Wi-Fi, known as 802.11be. At first glance, this amendment appears to be a simple evolution of the 802.11ax standard, with an increase in bandwidth and the number of spatial streams allowing to achieve data rates up to 40 Gbps. But the 802.11be standard also introduces the concept of "multilink operation", which raises challenges in terms of coexistence between stations equipped with the new technology and older devices. It is in this context that the research work presented in this thesis, which proposes an innovative solution to solve these coexistence problems within 802.11be networks.

Our approach is to penalize MLD stations that perform "free-riding" - i.e. that access the channel before their backoff process is complete - in order to restore fair access and obtain better throughput for legacy stations.

The proposed solution is based on a "contention window doubling with compensation" method. After a "free-ride" transmission, the contention window of the MLD station is doubled and its frozen backoff is reused for its next transmission. This increases the average waiting time of these stations and promotes fair channel access for all devices.

In the last chapter, we chose to use the MATLAB software to simulate and evaluate our proposed algorithm. MATLAB indeed offers great ease of use and the ability to transcribe a mathematical problem into a computer language close to the scientific natural language.

Mots clés : 802.11be , Synch-FT , Free-Riding, Repick , Doublement de CW et compensation.